

Colección de Energía Nuclear del OIEA

Nº NW-T-1.3

Principios
básicos

Objetivos

Guías

Informes
técnicos

Gestión de las fuentes radiactivas 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.

GESTIÓN DE LAS FUENTES
RADIATIVAS 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”.

COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA N° NW-T-1.3

GESTIÓN DE LAS FUENTES RADIATIVAS SELLADAS EN DESUSO

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA, 2022

DERECHOS DE AUTOR

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

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

© OIEA, 2022

Impreso por el OIEA en Austria

Mayo de 2022

STI/PUB/1657

GESTIÓN DE LAS FUENTES
RADIATIVAS SELLADAS EN DESUSO

OIEA, VIENA, 2022

STI/PUB/1657

ISBN 978-92-0-316120-6 (papel)

ISBN 978-92-0-316220-3 (PDF)

ISSN 2708-2016

PRÓLOGO

Uno de los objetivos que en su Estatuto se asigna al OIEA es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”. Una forma de lograr este objetivo es mediante la publicación de diversas colecciones de documentos técnicos. Dos de ellas son la *Colección de Energía Nuclear del OIEA* y la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*.

De conformidad con el artículo III.A.6 del Estatuto del OIEA, las normas de seguridad constituyen “normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad”. Estas normas se dividen en Nociones Fundamentales de Seguridad, Requisitos de Seguridad y Guías de Seguridad. Están redactadas fundamentalmente en un estilo normativo y son vinculantes para el OIEA en lo que respecta a sus propios programas. Los principales usuarios son los órganos reguladores de los Estados Miembros y otras autoridades nacionales.

La *Colección de Energía Nuclear del OIEA* comprende informes elaborados para promover y facilitar la I+D en relación con la energía nuclear y su aplicación con fines pacíficos, e incluye ejemplos prácticos para ser utilizados por los propietarios y explotadores de empresas de servicios públicos en los Estados Miembros, las organizaciones implicadas, el sector académico y los funcionarios gubernamentales, entre otros. Esa información se presenta en guías, informes sobre la situación tecnológica y los avances tecnológicos, y mejores prácticas relativas a los usos pacíficos de la energía nuclear, 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*.

Hace muchos decenios que las fuentes radiactivas selladas se utilizan de manera generalizada en la industria, la medicina y la investigación en los Estados Miembros y, si bien la mayoría han establecido un marco regulador para controlar esas fuentes y tienen las capacidades técnicas adecuadas para manipularlas correctamente, persisten aún varias incertidumbres en cuanto la gestión durante toda su vida útil. Los planes y prácticas de gestión que se ejecutan actualmente en los Estados Miembros pueden ser un tanto contradictorios y crear problemas para el almacenamiento, en especial la disposición final de las fuentes en desuso. Por ejemplo, no hay consenso respecto de los métodos apropiados de acondicionamiento de las fuentes en almacenamiento provisional central. En la mayor parte de los casos, los métodos utilizados se determinan, en gran medida, en función de las instalaciones disponibles, que se han construido principalmente para otros tipos de desechos. La experiencia del OIEA al trabajar con los Estados Miembros ha revelado que la infraestructura modesta y los presupuestos limitados de muchos de ellos exigen soluciones simples y de bajo costo, sin comprometer la seguridad tecnológica o física nuclear.

Reconociendo la necesidad de ayudar a los Estados Miembros en lo que respecta a la gestión segura y eficaz de las fuentes en desuso, el OIEA preparó un Plan de Acción sobre la Seguridad Tecnológica de las Fuentes de Radiación y la Seguridad Física de los Materiales Radiactivos, centrado en la elaboración de una serie de publicaciones que traten la manipulación, el acondicionamiento, el almacenamiento y la disposición final de esas fuentes. Desde la década de 1990 se han publicado varias publicaciones de esta colección, por ejemplo, *Technical Manual for the Management of Low and Intermediate Level Wastes Generated at Small Nuclear Research Centres and by Radioisotope Users in Medicine, Research and Industry*, con el objetivo de atender las necesidades de los Estados Miembros en desarrollo mediante la propuesta de soluciones tecnológicas que puedan satisfacer los requisitos, aplicar las medidas y cumplir los criterios establecidos en las publicaciones del OIEA, y que puedan integrarse fácilmente en un programa nacional general.

Aunque los Estados Miembros se han beneficiado de estas publicaciones editadas en los últimos dos decenios, se consideró necesario revisarlas y actualizarlas para aprovechar los avances y garantizar el cumplimiento de las normas modernas. Dado que en los informes publicados anteriormente se abordaban esferas específicas de la gestión de las fuentes selladas en desuso de las diferentes categorías de fuentes, esta publicación podría ofrecer una buena oportunidad de fusionar los contenidos en un único informe.

Hasta hace poco, la atención se centraba fundamentalmente en la seguridad tecnológica de las fuentes radiactivas; uno de sus aspectos es la seguridad física de la fuente. Sin embargo, dada la posibilidad de que se utilicen fuentes radiactivas en actos dolosos, la seguridad física de las fuentes ha cobrado un nuevo carácter de urgencia. El nuevo enfoque de control de las fuentes radiactivas de principio a fin puede brindar protección contra los usos dolosos, lo que entraña la consideración de que la seguridad física durante todo el ciclo de vida de las fuentes radiactivas, que abarque todas las fases, incluidos la fabricación, la distribución, la instalación, la puesta en servicio, la utilización, el almacenamiento y la disposición final, es de suma importancia.

En el presente informe se resume la información contenida en las publicaciones anteriores del OIEA y se ofrecen orientaciones sobre la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso. En él también se incluyen los problemas encontrados y las enseñanzas extraídas para ayudar a evitar los errores del pasado con respecto a la gestión de las fuentes en desuso.

Los oficiales del OIEA responsables de esta publicación fueron J. Balla y J.C. Benítez-Navarro 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	2
1.3.	Alcance	3
1.4.	Estructura	3
2.	CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES RADIATIVAS SELLADAS	5
2.1.	Características radiológicas, físicas y químicas	5
2.1.1.	Formas físicas	5
2.1.2.	Tipo de radiación	6
2.1.3.	Características físicas y químicas de los radionucleidos	6
2.2.	Estructura y diseño	11
2.2.1.	Fuentes gamma	11
2.2.2.	Fuentes alfa	12
2.2.3.	Fuentes beta	13
2.2.4.	Fuentes de neutrones	13
2.3.	Dimensiones	13
2.4.	Estado físico	14
3.	CATEGORIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN	15
3.1.	Fundamentos de la categorización de las fuentes radiactivas	15
3.2.	El sistema de categorización de fuentes del OIEA	16
3.3.	Agrupación de fuentes elaborada por el OIEA en función de la seguridad física	17
3.4.	Clasificación ISO de las fuentes	19
4.	APLICACIONES, DISPOSITIVOS Y FUENTES SELLADAS ASOCIADAS	20
4.1.	Dispositivos y fuentes de la categoría 1	20
4.1.1.	Generadores termoelectrónicos de radioisótopos	20
4.1.2.	Irradiadores	21
4.1.3.	Máquinas de teleterapia	25
4.1.4.	Máquinas fijas de teleterapia de haces múltiples (Gamma Knife®)	27
4.2.	Dispositivos y fuentes de la categoría 2	28
4.2.1.	Proyectores de gammagrafía industrial	28
4.2.2.	Máquinas de braquiterapia de alta/media tasa de dosis	30
4.2.3.	Sistemas de calibración	31
4.3.	Dispositivos y fuentes de la categoría 3	33
4.3.1.	Calibradores industriales fijos	33
4.3.2.	Fuentes de diagrafía de pozos	34
4.3.3.	Marcapasos	36
4.4.	Dispositivos y fuentes de la categoría 4	36
4.4.1.	Fuentes para braquiterapia de baja tasa de dosis	36
4.4.2.	Calibradores de espesor/nivel de carga	36
4.4.3.	Densímetros y medidores de humedad portátiles	38
4.4.4.	Densitómetros óseos	39
4.4.5.	Eliminadores de electricidad estática	39

4.5.	Dispositivos y fuentes de la categoría 5	40
4.6.	Situaciones específicas	42
4.6.1.	Pararrayos	42
4.6.2.	Usos en la investigación y la enseñanza	42
4.6.3.	Usos militares	43
4.7.	Masa y dimensiones de los dispositivos habituales.....	44
5.	PRINCIPIOS Y REQUISITOS EN MATERIA DE GESTIÓN	46
5.1.	Control reglamentario	47
5.2.	Responsabilidades	47
5.2.1.	Fabricante de la fuente.....	48
5.2.2.	Fabricante del dispositivo o equipo.....	48
5.2.3.	Distribuidor	49
5.2.4.	Usuario	49
5.2.5.	Organización central de gestión de desechos radiactivos	49
5.2.6.	Instalación de disposición final	50
5.3.	Registro de las fuentes radiactivas selladas.....	50
5.4.	Declaración de las fuentes en desuso	50
5.4.1.	Reducción de la actividad	51
5.4.2.	Fuga o daño	51
5.4.3.	Equipo obsoleto	51
5.4.4.	Tecnología alternativa	51
5.4.5.	Cambios en las prioridades	52
5.4.6.	Fuentes huérfanas	52
5.5.	Financiación	52
5.5.1.	Distribución de los costos	52
5.5.2.	Incertidumbre de los costos.....	53
5.5.3.	Falta de disponibilidad de una vía para la transferencia de la propiedad	53
5.6.	Capacidad técnica	54
5.6.1.	Emplazamiento del usuario	54
5.6.2.	Organización central de gestión de desechos radiactivos	54
5.6.3.	Instalación de disposición final	54
5.7.	Formación del personal	54
5.8.	Sistema de gestión.....	55
5.8.1.	Retos del sistema de gestión	56
5.8.2.	Procedimientos del sistema de gestión	57
5.8.3.	Enfoque graduado	57
5.8.4.	Gestión de registros.....	57
5.8.5.	Establecimiento y control de procesos	58
5.9.	Preparación y respuesta para casos de emergencia.....	59
5.10.	Seguridad física de las fuentes radiactivas	59
5.11.	Control de la criticidad	60
5.12.	Monitorización radiológica	60
5.13.	Problemas encontrados y enseñanzas extraídas	61
5.13.1.	Particularidades del sistema de reglamentación	61
5.13.2.	Calidad del registro de fuentes	62
5.13.3.	Exención	63
5.13.4.	Financiación.....	63
5.13.5.	Gestión de registros.....	63
5.13.6.	Evaluación del sistema de gestión.....	64

6.	ESTRATEGIA DE GESTIÓN	65
6.1.	Requisitos previos para la elaboración de la estrategia	65
6.2.	Opciones de gestión estratégica.	66
6.2.1.	Transferencia a otro usuario autorizado	67
6.2.2.	Devolución al suministrador o fabricante	68
6.2.3.	Almacenamiento previo a la disposición final	69
6.2.4.	Disposición final	69
6.3.	Tipo de instalación.	70
6.3.1.	Instalaciones compartidas	70
6.3.2.	Instalaciones centralizadas	70
6.3.3.	Instalaciones móviles.	70
6.4.	Formulación de una estrategia de gestión	70
6.5.	Problemas encontrados y enseñanzas extraídas	71
6.5.1.	Cuestiones generales	71
6.5.2.	Transferencia a otro usuario autorizado	71
6.5.3.	Devolución al suministrador o fabricante	72
6.5.4.	Almacenamiento previo a la disposición final	72
6.5.5.	Disposición final	73
7.	CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES EN DESUSO	74
7.1.	Información requerida	74
7.2.	Grupos de caracterización de fuentes en desuso	74
7.3.	Identificación de las fuentes	75
7.4.	Caracterización de fuentes no documentadas	77
7.4.1.	Requisitos del sistema de caracterización	74
7.4.2.	Recuperación de datos históricos	78
7.4.3.	Caracterización mediante métodos de análisis no destructivo	78
7.4.4.	Caracterización con métodos destructivos	79
7.5.	Caracterización de fuentes con fugas	79
7.6.	Enseñanzas extraídas	80
8.	MANIPULACIÓN DE LAS FUENTES	81
8.1.	Requisitos de seguridad en la manipulación	81
8.2.	Planificación de labores.	81
8.3.	Manipulación rutinaria de fuentes.	82
8.3.1.	Recogida	82
8.3.2.	Segregación	82
8.3.3.	Extracción de las fuentes de sus dispositivos	84
8.3.4.	Reubicación dentro del emplazamiento.	85
8.4.	Equipos e instrumentos para la manipulación de las fuentes	85
8.4.1.	Pinzas y blindaje temporal.	85
8.4.2.	Cabinas herméticas	87
8.4.3.	Celdas calientes	88
8.4.4.	Contenedores	88
8.4.5.	Equipos de levantamiento y transferencia.	89
8.5.	Problemas encontrados al manejar fuentes de actividad alta	91

9.	ALMACENAMIENTO	93
9.1.	Requisitos de diseño de los bultos de fuentes DSRS	93
9.2.	Requisitos de diseño de las instalaciones de almacenamiento	95
9.3.	Requisitos operacionales de las instalaciones de almacenamiento	96
9.3.1.	Recepción y colocación	96
9.3.2.	Blindaje adicional	97
9.3.3.	Control de la integridad	97
9.3.4.	Recuperación y despacho	97
9.3.5.	Sistemas de seguridad física	98
9.4.	Ejemplos de instalaciones de almacenamiento en el emplazamiento	98
9.4.1.	Cajas fuertes de suelo	98
9.4.2.	Salas a prueba de intrusión	99
9.4.3.	Depósitos y cámaras de hormigón	100
9.4.4.	Comparación de los sistemas de almacenamiento en el emplazamiento	100
9.4.5.	Problemas encontrados y enseñanzas extraídas	101
9.5.	Ejemplos de instalaciones de almacenamiento centralizadas	105
9.5.1.	Almacenamiento subsuperficial	106
9.5.2.	Almacenamiento superficial	107
9.5.3.	Problemas encontrados y enseñanzas extraídas	109
10.	ACONDICIONAMIENTO	113
10.1.	Efectos de los requisitos de aceptación del bulto	113
10.2.	Especificaciones de los bultos de desechos	114
10.3.	Requisitos de diseño de las instalaciones de acondicionamiento	114
10.4.	Requisitos operacionales de las instalaciones de acondicionamiento	115
10.5.	Selección de un método de acondicionamiento	116
10.5.1.	Criterios de selección	116
10.5.2.	Selección de los materiales para bultos de desechos	116
10.6.	Métodos de acondicionamiento	117
10.6.1.	Fuentes en desuso con radionucleidos de período corto	117
10.6.2.	Fuentes en desuso con radionucleidos de período largo	118
10.6.3.	Fuentes de neutrones	121
10.6.4.	Fuentes de actividad alta en desuso	122
10.7.	La instalación de celda caliente móvil del OIEA	124
10.8.	Enseñanzas extraídas	126
10.8.1.	Fuentes de período corto	126
10.8.2.	Fuentes de período largo	126
10.8.3.	Fuentes de actividad alta	126
11.	TRANSPORTE	128
11.1.	Reglamento de transporte	128
11.2.	Opciones de transporte	129
11.2.1.	La fuente se mantiene en el portafuente original	130
11.2.2.	La fuente se retira del portafuente original	133
11.3.	Problemas encontrados y enseñanzas extraídas	136
11.3.1.	Financiación insuficiente	136
11.3.2.	Dificultades para la concesión de licencias	136
11.3.3.	Inexistencia del certificado de la fuente o de información sobre ella	137
11.3.4.	Inexistencia de un certificado de material radiactivo en forma especial	137
11.3.5.	Falta de adecuación de un bulto de transporte original	137

12. DISPOSICIÓN FINAL.....	139
12.1. Factores que determinan la selección de las opciones de disposición final	139
12.1.1. Sistema de clasificación de desechos del OIEA	140
12.1.2. Inventario de fuentes DSRS, correspondientes características de los radionucleidos y clases de desechos	141
12.1.3. Opciones de disposición final de fuentes DSRS en el contexto del inventario nacional de desechos radiactivos.....	143
12.1.4. Acondicionamiento de fuentes DSRS con fines de disposición final: bulto de desechos.....	145
12.1.5. Requisitos de aceptación de desechos con fines de disposición final	145
12.2. Opciones de disposición final	146
12.2.1. Disposición final cerca de la superficie.....	146
12.2.2. Disposición final geológica	148
12.2.3. Disposición final en pozos barrenados y pozos convencionales.....	149
12.3. Problemas encontrados y enseñanzas extraídas	152
12.3.1. Disposición final cerca de la superficie.....	152
12.3.2. Disposición final geológica	152
12.3.3. Disposición final en pozos barrenados	153
13. JUSTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD	154
13.1. Principios de evaluación de la seguridad.....	154
13.2. Proceso de evaluación de la seguridad	155
14. CONCLUSIONES	158
REFERENCIAS.....	161
ABREVIACIONES.....	165
ANEXO: RIESGOS ASOCIADOS A LAS FUENTES EN DESUSO	167
COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN	173
ESTRUCTURA DE LA <i>COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA</i>	175

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Las fuentes radiactivas selladas se utilizan ampliamente en la agricultura, la industria, la medicina y varios ámbitos de investigación en los Estados Miembros desarrollados y en desarrollo. Prácticamente todos los países utilizan fuentes radiactivas selladas con algún fin. Se estima que el inventario total de fuentes radiactivas selladas asciende a varios millones. A pesar de su tamaño físico esencialmente pequeño, muchas fuentes contienen concentraciones muy elevadas de radionucleidos (las fuentes industriales y médicas suelen estar en el rango de GBq a PBq). La radiación que emiten esas fuentes es bastante intensa, por lo que se necesitan contenedores fuertemente blindados para su uso, transporte y almacenamiento seguros.

Las fuentes radiactivas que ya no se utilizan o que no están destinadas a utilizarse en la tarea para la que se ha concedido una autorización se denominan *en desuso* [1]. Si una fuente, como resultado de la desintegración radiactiva, ya no es adecuada para cumplir la función para la que estaba prevista, se considera *gastada*. Es importante destacar que una fuente declarada en desuso por un usuario puede seguir siendo utilizada por otro usuario, suministrador o fabricante. Una fuente radiactiva sellada en desuso o gastada puede seguir siendo muy radiactiva y potencialmente peligrosa para la salud humana y el medio ambiente. El carácter y la magnitud de los diversos problemas asociados a las fuentes radiactivas selladas en desuso se abordan en la referencia [2].

Aunque la gran mayoría de las fuentes radiactivas que se utilizan en todo el mundo se gestionan en condiciones de seguridad tecnológica y física, lo que aporta muchos beneficios a la humanidad, se han producido varios accidentes relacionados con fuentes radiactivas [3-10]. Cuando la cantidad de material radiactivo era considerable, como en el caso de las fuentes de radioterapia o de las fuentes de radiografía industrial, los accidentes han tenido consecuencias graves o incluso mortales [3, 5]. La mayoría de los accidentes estuvieron relacionados con fuentes radiactivas selladas en uso, las cuales aún estaban sometidas a control reglamentario; sin embargo, se han producido varios accidentes con fuentes en desuso cuando el control reglamentario era deficiente o totalmente inexistente. Algunos de esos accidentes causaron la contaminación de extensas superficies, lo que comportó costosas operaciones de limpieza para mitigar sus consecuencias [3].

A fin de reducir los riesgos asociados a las fuentes radiactivas selladas en desuso (DSRS), es importante contar con una estrategia nacional, un marco jurídico y una infraestructura adecuadamente establecidos para la gestión segura de las DSRS tanto en el emplazamiento del usuario como en todo el país. Es esencial que las fuentes que están en uso o que se han declarado en desuso no entrañen ningún peligro potencial para los trabajadores, el público en general o el medio ambiente. Lo ideal sería que se cumplieran y aplicaran todos los requisitos para la gestión segura de las fuentes radiactivas selladas antes de que comience la aplicación concreta de esas fuentes en un Estado Miembro.

Es posible que los países que carecen de una infraestructura completa de protección radiológica y de sistemas de gestión de desechos no conozcan los riesgos asociados a las fuentes radiactivas en desuso. Incluso algunos países desarrollados que utilizan ampliamente las fuentes radiactivas selladas pueden subestimar los riesgos que entrañan y, por ende, es posible que no tengan un control plenamente eficaz de sus fuentes radiactivas, aunque cuenten con una legislación adecuada, protección radiológica y un sistema de gestión de desechos [9]. Otros países no conceden una prioridad lo suficientemente alta a los programas de gestión de las DSRS porque hay cuestiones más urgentes a las que tienen que dedicar los recursos de que disponen. Incluso aunque se reconozcan los riesgos asociados al uso de las fuentes radiactivas selladas, siguen existiendo importantes riesgos potenciales asociados a las fuentes radiactivas selladas en desuso.

El número de fuentes radiactivas en desuso en un determinado Estado Miembro no influye en las consecuencias de un accidente en concreto, pero aumenta las probabilidades de que tenga lugar un accidente. El nivel de control reglamentario y su eficacia también tienen incidencia en las probabilidades de un accidente. Las consecuencias de esos accidentes se rigen por las características de la fuente (diseño de la fuente, actividad, forma química, etc.), la índole del accidente, las personas involucradas, las contramedidas adoptadas, etc.

En la década de 1990 aumentó la preocupación internacional por las fuentes radiactivas que, por una u otra razón, no estaban sujetas a control reglamentario o cuyo control reglamentario había sido insuficiente. El programa del OIEA sobre las DSRS se estableció en 1991 con el objetivo específico de ayudar a los Estados Miembros en su empeño por evitar situaciones que pudieran dar lugar a una exposición radiológica innecesaria o a accidentes.

El programa incluye la prestación de asistencia técnica a los Estados Miembros en forma de informes técnicos del OIEA, capacitación de expertos y desarrollo o mejora de la infraestructura necesaria mediante el suministro de herramientas y equipo y la transferencia de tecnología a través del servicio de evaluación del OIEA, con el fin de evaluar el marco regulador de la seguridad radiológica de un Estado Miembro.

En 2011, el OIEA editó la publicación de la categoría Requisitos de Seguridad Generales *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad — Edición provisional* (en adelante NBS), *Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSR Part 3* [11]. Esta publicación sustituyó a las *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación*, que se había publicado en 1996 [12]. Se ha establecido un instrumento jurídico internacional de carácter vinculante por conducto de la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos (en adelante, la Convención Conjunta) [13]. En virtud del artículo 28 de la Convención Conjunta, las Partes Contratantes han de asegurar que la posesión, reelaboración o disposición final de fuentes selladas en desuso tenga lugar de manera segura, y las Partes Contratantes permitirán la readmisión en su territorio de las DSRS (si se acepta en el marco de sus leyes nacionales). El OIEA también ha publicado el Código de Conducta sobre la Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas (en adelante, el Código de Conducta) [14]. Los objetivos del Código de Conducta son, mediante la elaboración, armonización y ejecución de las políticas, leyes y reglamentos nacionales, y mediante el fomento de la cooperación internacional:

- lograr y mantener un alto nivel de seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas;
- prevenir el acceso no autorizado o el daño a fuentes radiactivas y la pérdida, el robo o el traslado no autorizado de esas fuentes, a fin de reducir la probabilidad de una exposición accidental nociva a ellas o su utilización con fines dolosos para causar daños a las personas, la sociedad o el medio ambiente;
- mitigar o minimizar las consecuencias radiológicas de todo accidente o acto doloso relacionado con una fuente radiactiva.

El OIEA sigue estudiando distintas formas de mejorar su programa de gestión de desechos radiactivos para apoyar a diversos Estados Miembros. Hay una nueva iniciativa específicamente relacionada con la gestión del final de la vida útil de las DSRS, en particular cuando las fuentes en desuso se gestionan como desechos radiactivos. Hasta hace poco, la atención se centraba principalmente en la seguridad tecnológica de las fuentes radiactivas; uno de sus aspectos es la seguridad física de la fuente. Sin embargo, dada la posibilidad de que se utilicen fuentes radiactivas en actos dolosos, la seguridad física de las fuentes ha cobrado un nuevo carácter de urgencia. El nuevo enfoque de control de las fuentes radiactivas de principio a fin puede brindar protección contra los usos dolosos. Ese enfoque incluye la consideración de que la seguridad física durante todo el ciclo de vida de las fuentes radiactivas, comprendidas todas las fases, incluidos la fabricación, la distribución, la instalación, la puesta en servicio, la utilización, el almacenamiento y la disposición final, es de suma importancia.

1.2. OBJETIVO

El principal objetivo del presente documento es proporcionar material de referencia y orientación técnica sobre la gestión segura de las DSRS en todos los aspectos, incluidos la manipulación, el acondicionamiento, el transporte, el almacenamiento y la disposición final. Se prevé que el presente documento será útil y de interés directo para diversas partes interesadas, entre ellas los responsables de la formulación de políticas, los usuarios de las fuentes radiactivas selladas, los explotadores de instalaciones de gestión de desechos y los órganos reguladores, en especial en los Estados Miembros que están estudiando distintas opciones o elaborando estrategias para la gestión segura de las DSRS. Tiene por objeto responder a las necesidades de diversos Estados Miembros en cuanto a la gestión de las fuentes en desuso, lo que comprende desde los países que cuentan con una infraestructura y un marco regulador de gestión de fuentes radiactivas con un nivel de desarrollo relativamente adecuado hasta los países que se encuentran en una fase muy temprana de la planificación conceptual de la gestión de fuentes radiactivas en desuso.

1.3. ALCANCE

En el presente documento se expone información sobre la gestión de las DSRS basada en la información recopilada en una serie de publicaciones técnicas anteriores del OIEA que se editaron entre 1990 y 2003 [2, 15-19]. Ahora bien, la información que figura en esas publicaciones se ha examinado y se ha mejorado con la inclusión de nuevas técnicas de gestión desarrolladas en los últimos años.

El alcance del informe abarca todos los tipos de fuentes DSRS, excepto los que están exentos de control reglamentario, por ejemplo, los relojes o las esferas de instrumentos. En todo caso, el informe incluye los detectores de humo y otras fuentes de actividad baja, que han quedado eximidas del control reglamentario como fuentes individuales pero que, tras su recogida, pueden representar un riesgo importante y, por lo tanto, tienen que gestionarse de forma segura. Se examinan, con cierto detalle, diversos enfoques, opciones y procedimientos para la manipulación, el acondicionamiento, el transporte, el almacenamiento y la disposición final de las DSRS, y los requisitos del sistema de gestión asociado. En cada etapa de la gestión de desechos se incluyen algunos problemas detectados y enseñanzas extraídas.

1.4. ESTRUCTURA

El presente informe consta de 14 secciones y 1 anexo. En las secciones 2 a 6 se tratan los temas generales de la gestión de las DSRS, mientras que en las secciones 7 a 12 se revisan las principales etapas de la gestión de las DSRS en orden consecutivo. El orden consecutivo se refiere a un escenario idóneo de gestión de las DSRS, cuando todas las instituciones, instalaciones y personal funcionan y operan debidamente. Por supuesto, esa situación apenas se da en la mayoría de los Estados Miembros; con todo, el enfoque ofrece la ventaja de exponer el escenario idóneo para la gestión de las DSRS. Al final de cada sección dedicada a una etapa de la gestión de las DSRS figuran varios ejemplos junto con las correspondientes enseñanzas extraídas.

En la sección 2 se esbozan las principales características radiológicas, físicas y químicas de las fuentes radiactivas selladas, que son importantes con miras a seleccionar las opciones de gestión adecuadas para las fuentes.

En la sección 3 figura información general sobre los enfoques internacionales actuales para categorizar y clasificar las fuentes radiactivas selladas.

En la sección 4 se describen los dispositivos, junto con las fuentes asociadas, que se utilizan en diversas aplicaciones, teniendo en cuenta que un buen conocimiento de la aplicación específica de la fuente y el equipo utilizado es una consideración importante para formular una estrategia de gestión de las fuentes en desuso.

En la sección 5 se presentan los elementos básicos de un sistema nacional de gestión segura de las fuentes radiactivas en desuso, incluidos los aspectos jurídicos, reglamentarios y de concesión de licencias, la capacidad técnica y los mecanismos de financiación; asimismo, se describen los elementos de un sistema moderno de gestión aplicado en todas las actividades. En esta sección también se indican las principales razones y fundamentos para declarar que una fuente radiactiva sellada está “en desuso” o “gastada”.

En la sección 6 se examina un enfoque para seleccionar una estrategia de gestión de las fuentes radiactivas en desuso y se exponen varias opciones fundamentales en materia de gestión.

En la sección 7 se aborda la caracterización de las fuentes radiactivas selladas mediante diversos métodos no destructivos y destructivos y se pone de relieve el papel de la caracterización a la hora de seleccionar una opción para la gestión tecnológica y físicamente segura.

En la sección 8 se estudian los procedimientos, el equipo y las herramientas de manipulación que se utilizan en las diferentes etapas de la gestión de las DSRS.

En la sección 9 se examina el almacenamiento de las fuentes en desuso no acondicionadas en las instalaciones del usuario y el almacenamiento de las DSRS acondicionadas en almacenes centrales, en especial en lo que atañe a las características de diseño de un bulto de desechos aceptado para su almacenamiento y los requisitos de diseño de una instalación de almacenamiento, con énfasis en la importancia de la evaluación de la seguridad de esas instalaciones. También figura un resumen de los enfoques utilizados para el almacenamiento de las fuentes de actividad alta, incluida una descripción de los procesos específicos.

En la sección 10 se aborda el acondicionamiento de diferentes tipos de fuentes en desuso. Comienza por los requisitos de acondicionamiento, incluidos el diseño, el funcionamiento y el mantenimiento de registros. También

se analizan las recomendaciones para seleccionar una metodología de acondicionamiento apropiada, incluida una descripción de diversos métodos de acondicionamiento.

En la sección 11 se examina el transporte de las fuentes radiactivas en desuso, con una presentación del Reglamento de Transporte del OIEA, y se abordan los problemas en materia de transporte que son exclusivos de las fuentes radiactivas de actividad alta. También se analizan varias opciones de transporte.

En la sección 12 se abordan las opciones de disposición final de las fuentes radiactivas en desuso, incluido un examen de las características específicas de las fuentes radiactivas que entrañan un problema para su disposición final. También se presenta un examen de los problemas detectados y las enseñanzas extraídas, y se analiza el concepto de disposición final en pozos barrenados como una opción que puede considerarse prometedora.

En la sección 13 se describe la función de las evaluaciones de seguridad durante toda la vida útil de la instalación o actividad, siempre que los diseñadores, los constructores, los fabricantes, la entidad explotadora o el órgano regulador deban tomar decisiones sobre las opciones de gestión y las cuestiones de seguridad conexas. También se representa brevemente el proceso de elaboración de las evaluaciones de seguridad.

En la sección 14 se resumen los logros en la gestión de las fuentes radiactivas en desuso, entre las que cabe destacar algunas actividades importantes para encarar las cuestiones problemáticas.

En el anexo se abordan los riesgos radiológicos asociados a las fuentes en desuso, en particular cuando el control es insuficiente o se ha perdido por completo. Se examinan brevemente algunos accidentes con fuentes en desuso.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES RADIATIVAS SELLADAS

Una fuente de radiación es toda fuente capaz de emitir radiación ionizante. Las fuentes que se examinan en esta publicación son las fuentes radiactivas selladas, que contienen material radiactivo como fuente primaria de radiación ionizante (otras fuentes pueden ser los rayos X, los reactores nucleares o los aceleradores de partículas). Según el *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA* [1], una fuente sellada es “material radiactivo sellado de forma permanente en una cápsula o fuertemente consolidado y en forma sólida”. La cápsula o el material de una fuente sellada son duraderos y tienen la resistencia suficiente para mantener la estanqueidad en las condiciones de uso y desgaste para las que se diseñó originalmente la fuente, así como en los percances previsibles [10]. En muchos casos, se utiliza un doble encapsulamiento.

Las fuentes radiactivas se utilizan en una amplia gama de prácticas en la industria, la medicina, la agricultura, la investigación y la educación, así como en aplicaciones militares y de defensa. Las fuentes que se utilizan en esas aplicaciones contienen una variedad de radionucleidos, formas y cantidades de material radiactivo y presentan una amplia gama de propiedades físicas, químicas y radiológicas.

Cuando una fuente sellada queda en desuso, es necesario seleccionar una opción de gestión adecuada para ella. Para seleccionar una opción de gestión es importante obtener toda la información necesaria sobre los parámetros de la fuente. En las secciones siguientes se describen brevemente los parámetros y las características de las fuentes selladas que son más importantes a la hora de seleccionar y aplicar una opción de gestión adecuada.

Los parámetros más importantes son los siguientes:

- Forma física: En la mayoría de las ocasiones, sólida; líquida o gaseosa en muy pocos casos.
- Características radiológicas: Radionucleido, tipo de radiación (alfa, beta, gamma, neutrónica), actividad, período de semidesintegración, energía y factores de conversión de la dosis.
- Emisión de neutrones (para fuentes de neutrones).
- Características químicas: Compuestos o aleaciones utilizadas, solubilidad, etc.
- Estructura y diseño (incluidas las dimensiones de la carga activa y la cápsula).
- Condición física: Intacta, dañada o con fugas.
- Otras características relacionadas con el modo particular de aplicación de una fuente (resistencia a la corrosión, propiedades térmicas, estabilidad, etc.).

El período de semidesintegración de los radionucleidos de una fuente, así como su actividad, es especialmente importante a la hora de elegir una opción de disposición final de las fuentes en desuso.

2.1. CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS

2.1.1. Formas físicas

El material radiactivo de las fuentes radiactivas selladas se puede agrupar de la siguiente manera, según sus propiedades físicas:

- Sólido: La mayoría en forma metálica, cerámica, a veces en polvo comprimido y sales raramente solubles.
- Gaseoso: Principalmente ^{85}Kr y ^3H .
- Líquido: No es habitual.

El polvo o los materiales solubles pueden dar lugar a contaminación radiactiva si el encapsulamiento se filtra.

2.1.2. Tipo de radiación

En general, los radionucleidos pueden emitir diferentes tipos de radiación simultáneamente. La emisión de partículas, como la radiación alfa y beta, suele ir acompañada de emisión gamma. Incluso en el caso de los emisores beta puros, hay que tener en cuenta la radiación de frenado¹.

En el caso de los radionucleidos cuyos productos de desintegración son también radiactivos, hay que considerar también las mismas características del producto de desintegración. Por lo que respecta a este documento, la forma química y la estructura de los graneles que incorpora el radionucleido (por ejemplo, el cloruro de cesio en forma de sal granular) es asimismo importante.

2.1.3. Características físicas y químicas de los radionucleidos

A continuación se detallan las principales características de determinados radionucleidos en las fuentes selladas.

Radio

El radio 226 forma parte de la serie de desintegración radiactiva del ²³⁸U; tiene un período de semidesintegración muy prolongado (1600 años) y es un potente emisor alfa con un bajo nivel de energía gamma. El radio 226 se desintegra por emisión alfa en ²²²Rn, gas noble con un período de semidesintegración de 3,6 días. Antes de que la cadena de desintegración radiactiva termine en el isótopo estable ²⁰⁶Pb, se generan ocho productos de desintegración, de los que cuatro son emisores alfa. Cada átomo de ²²⁶Ra en desintegración da lugar a cinco partículas alfa. Durante la desintegración también se emiten muchos fotones gamma y partículas beta de alta y baja energía. En una fuente de radio, los productos de desintegración están siempre presentes, además del nucleido padre ²²⁶Ra. Por lo tanto, su valor de constante gamma es bastante alto [11].

Las viejas fuentes médicas de radio constituyen un problema para su gestión puesto que a menudo se filtran debido a la sobrepresión interna creada por la desintegración de ²²⁶Ra que forma el radón y el helio. El pequeño tamaño de las fuentes impide su marcado, lo que confiere a las fuentes radiactivas selladas el aspecto engañosamente inofensivo de una pieza de metal pequeña y lisa. El alto valor aparente de esas pequeñas fuentes, a menudo colocadas dentro de una cápsula de platino, aumenta el riesgo de robo.

El radio es un metal alcalino térreo. Es muy reactivo, y reacciona incluso con el nitrógeno. Por lo tanto, en las fuentes radiactivas, el radio siempre se utiliza en forma de sales, que pueden ser bromuros, cloruros, sulfatos o carbonatos. Todas son solubles en agua en cantidades que pueden dar lugar a problemas radiológicos. En el cuerpo, el radio se comporta como el calcio, lo que significa que se concentra en los huesos. Por todos estos motivos, el radio ya no se considera un radionucleido ideal para su uso en fuentes selladas.

Cobalto

El cobalto es un elemento metálico con un solo isótopo estable: ⁵⁹Co. Cuando los lingotes de cobalto natural se colocan en un reactor nuclear, los núcleos absorben neutrones térmicos para generar ⁶⁰Co, radionucleido con un período de semidesintegración de 5,27 años. El cobalto 60 sufre una desintegración beta (emite un electrón y un neutrino) y emite dos rayos gamma con cada desintegración: uno a 1,173 MeV y otro a 1,333 MeV, y finalmente se desintegra en el isótopo estable ⁶⁰Ni. Las fuentes de cobalto 60 se producen como fuentes de elevada actividad específica para la teleterapia y la radiografía industrial, y como fuentes industriales para irradiadores y otras aplicaciones. Las fuentes de elevada actividad específica son pequeñas pastillas (normalmente cilindros de 1 mm de diámetro y altura) de metal que se producen en reactores nucleares especializados de alto flujo.

En las fuentes radiactivas selladas, el cobalto metálico se emplea frecuentemente porque da lugar a la mayor actividad específica para la fuente. Por lo general, el ⁶⁰Co se presenta en forma de discos delgados o pequeños lingotes o pastillas cilíndricos soldados en cápsulas de acero inoxidable. El cobalto metálico no es soluble en el agua y es estable en el aire, pero se forma una fina capa de óxido en su superficie y ello podría causar contaminación,

¹ **Radiación de frenado:** Radiación emitida por la disminución de la velocidad de las partículas cargadas de luz, como los rayos X que se producen cuando los electrones de un acelerador se detienen en un blanco de metal.

en caso de que el cobalto se manipule sin protección. Por ese motivo, el cobalto que se utiliza en las fuentes radiactivas se niquela antes de su activación [20].

Cesio

El cesio 137 se produce mediante la fisión de núcleos de uranio y la posterior separación química del cesio del combustible nuclear irradiado o de los blancos. La mayoría de las instalaciones que procesan (reprocesan) químicamente el combustible nuclear gastado para recuperar el uranio y el plutonio dejan cesio en el flujo de desechos. El cesio en realidad está compuesto por cuatro isótopos: ^{133}Cs (estable), ^{134}Cs (período de semidesintegración: 2 años), ^{135}Cs (período de semidesintegración: 2,3 millones de años), y ^{137}Cs (período de semidesintegración: 30 años). El cesio 137 se considera generalmente un emisor gamma de energía media, aunque los fotones gamma de energía de 662 keV son producidos por el $^{137}\text{Ba}^m$ que se forma a partir del ^{137}Cs por desintegración beta.

El cesio es un elemento metálico alcalino muy reactivo, similar al potasio y al sodio. Debido a su alta reactividad, solo puede utilizarse como compuesto químico en una fuente radiactiva sellada. Por lo general, el ^{137}Cs se suministra como cloruro de cesio, una sal cristalina (relacionada química y estructuralmente con la sal de mesa, esto es, el cloruro sódico) que se puede fabricar con distintos tamaños de partículas, desde bloques de unos centímetros hasta polvo, como se utiliza en la fabricación de fuentes de cloruro de cesio radiactivo. Después de prensarlo en frío para formar una pastilla dentro de un recipiente de acero inoxidable en forma de dedal, el recipiente se carga en una cápsula protectora de acero inoxidable que se suelda para formar la contención interna, y una segunda funda de acero inoxidable se suelda sobre la primera para formar la verdadera fuente sellada de cloruro de cesio radiactivo. La producción de fuentes de cloruro de cesio radiactivo se lleva a cabo a unos 200 °C porque el cloruro de cesio es higroscópico.

El cloruro de cesio es soluble en agua a temperatura ambiente y, por lo tanto, si se extrae de forma intencionada o accidental de su recipiente, puede dispersarse fácilmente. Si se produjera una fuga en el contenedor de acero inoxidable, podría disolverse en el agua y contaminar las proximidades. Es altamente reactivo en el ambiente; se une a las superficies e incluso migra hacia el hormigón. Si entra en el cuerpo, se dispersa por donde fluye el agua y genera una dosis a cuerpo entero.

Un enfoque para reducir los problemas que plantea la altísima solubilidad del cloruro de cesio en el agua consiste en utilizar otro compuesto que contiene ^{137}Cs como sustituto directo del polvo de cloruro de cesio. Un proceso adecuado incluye la evaporación y el esmaltado en vasos de alúmina sinterizada, en pastillas sinterizadas de “polucita” (silicoaluminato de cesio $\text{Cs}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) o en pastillas y varillas de cerámica. Estas formas hacen que el radionucleido sea prácticamente insoluble en el agua, pero en este caso se produce una drástica reducción de la actividad específica.

Un enfoque alternativo para reducir la solubilidad y la dispersabilidad consiste en fabricar cemento que incorpore ^{137}Cs mediante la adición de rellenos y pasta de cemento. Este enfoque tiene la ventaja de un procesamiento a baja temperatura y, con una elección juiciosa de la fase de cemento, una baja solubilidad acuosa. Sin embargo, la dilución asociada a la fabricación de cemento limita la actividad específica alcanzable. Además, el producto sigue siendo un sólido quebradizo que podría degradarse debido a los efectos de la radiación, por lo que no disminuye la dispersabilidad potencial del cesio en una explosión. El enfoque del cemento tiene ventajas para la inmovilización a gran escala de los desechos que contienen ^{137}Cs .

Estroncio

El estroncio es un metal reactivo que se encuentra normalmente como cloruro, nitrato, óxido o titanato en las fuentes. Tiene cuatro isótopos estables: estroncio 84, estroncio 86, estroncio 87 y estroncio 88; el último es el más abundante en la naturaleza (un 82,6 %). El radionucleido ^{90}Sr es un producto de fisión que se genera en el 5,8 % de las fisiones térmicas en ^{235}U y en el 2 % de las fisiones térmicas en ^{239}Pu . El estroncio 90 se desintegra por desintegración beta (0,546 MeV) con un período de semidesintegración de 28,78 años en ^{90}Y , que a su vez se desintegra por desintegración beta de energía bastante alta (2,28 MeV) con un período de semidesintegración de 2,67 días.

Habitualmente, el ^{90}Sr se emplea como titanato en forma de cerámica. En el caso de algunas aplicaciones médicas, el compuesto de estroncio está en una placa de plata y blindado con plata recubierta con 0,1 mm de

paladio. Para otras aplicaciones, el compuesto de estroncio puede estar incorporado en cerámica, cuentas de vidrio o láminas de plata enrolladas.

El estroncio 90 se genera en reactores de energía nuclear o de producción de isótopos. No emite rayos gamma penetrantes, por lo que cuando es un contaminante solo suscita preocupación por la exposición externa si se deposita en la piel. Las principales preocupaciones son las exposiciones internas debido a las altas emisiones de energía beta y a que el estroncio se encuentra en el mismo grupo químico que el calcio, de modo que el cuerpo humano concentra el estroncio ingerido en los huesos, en los que reside en rigor de forma permanente en lugar de ser eliminado a través de las funciones fisiológicas comunes. Sin embargo, las fuentes de actividad alta de ^{90}Sr producen una importante radiación de frenado al detener los electrones de alta energía emitidos por la desintegración nuclear. Esa radiación de frenado puede incluso causar efectos deterministas en la salud si se trata de una fuente de actividad muy alta (se produjo un incidente de este tipo con un generador termoeléctrico de radioisótopos en Georgia en 2002).

Iridio

El iridio, uno de los dos metales más densos ($22,42 \text{ g/cm}^3$, igual que el osmio), es muy duro y quebradizo, y es difícil de mecanizar. También es muy resistente a la reacción química y tiene un punto de fusión alto (más de $2400 \text{ }^\circ\text{C}$) [20]. El iridio natural, que se encuentra aleado con el platino y en los minerales de níquel, es un 37 % ^{191}Ir y un 63 % ^{193}Ir . Las fuentes de radiación de iridio 192 se utilizan en la gammagrafía (por ejemplo, en la inspección no destructiva de tuberías) y en la braquiterapia.

Las fuentes de radiación de iridio 192 se fabrican mediante la irradiación de iridio natural en un reactor nuclear. El iridio 191 puede capturar un neutrón para crear ^{192}Ir , que tiene un período de semidesintegración de 73,83 días y una probabilidad del 95 % de desintegrarse por desintegración beta en ^{192}Pt y emitir rayos gamma, y una probabilidad del 5 % de desintegrarse por captura de electrones para formar ^{192}Os . En la desintegración en ^{192}Pt , se emiten en promedio 2,33 rayos gamma con energías que van de 135 keV a 1,378 MeV, con una energía media de 380 keV.

Las fuentes de iridio suelen presentarse en forma de alambres o pilas de láminas en forma de disco en lugar de pastillas, lingotes o polvos de material a granel. Las fuentes usadas de ^{192}Ir pueden ser generalmente devueltas a su fabricante y distribuidor o almacenadas para su desintegración debido a su período de semidesintegración relativamente corto. Así pues, aunque la disposición final del ^{192}Ir no es un problema, el breve período de semidesintegración obliga a los usuarios a sustituir las fuentes con frecuencia, lo que significa que muchas fuentes se están transportando o están almacenadas en todo momento.

Americio

El americio es un elemento actínido o transuránico sin isótopos estables. Al igual que los demás actínidos, el americio se oxida con bastante facilidad. El americio se produce por capturas de neutrones sucesivas en ^{238}U , sus productos de activación y productos de desintegración, para producir ^{241}Pu , que se desintegra en ^{241}Am con un período de semidesintegración de 14,4 años. El americio se recupera de las reservas de plutonio envejecido en las que se acumula a través de la desintegración radiactiva. El americio 241 se desintegra con un período de semidesintegración de 432,7 años emitiendo una partícula alfa. La partícula alfa tiene una energía media de 5,465 MeV y va acompañada de un rayo X de 13,9 keV en el 43 % de las desintegraciones, por un rayo X de 59,5 keV en el 36 % de las desintegraciones y por ningún rayo X en el resto de las desintegraciones. El producto de la desintegración, ^{237}Np , también es radiactivo, con un período de semidesintegración de 2 millones de años. El americio 241 se utiliza como fuente alfa y con el berilio como fuente de neutrones (se denomina fuente de americio-berilio o Am-Be). En una fuente de Am-Be, algunas de las partículas alfa de la desintegración del americio son absorbidas por el berilio, que emite un neutrón con una energía que va de 0 MeV a cerca de 11 MeV, con una energía media de aproximadamente 6 MeV. El Am-Be produce cerca de 1 neutrón por 20 000 desintegraciones alfa.

La “vida útil recomendada” de una fuente de Am-Be es de 15 años, período después del cual los fabricantes de la fuente recomiendan que las fuentes se certifiquen de nuevo (si están en buenas condiciones), se reencapsulen (si la cápsula está ligeramente dañada, pero el diseño sigue en uso) o se reciclen (si el diseño ya no se usa o el daño en la cápsula es grave, el Am-Be en bruto puede retirarse y utilizarse para fabricar una nueva fuente).

El americio tiene características químicas similares a las de los metales de tierra rara. Normalmente, el ^{241}Am se utiliza en forma de óxido en las fuentes selladas. En el caso de las fuentes de neutrones, el polvo de óxido fino se mezcla con el polvo de berilio y se sinteriza en un producto similar a la cerámica, que es estable en el aire y en el que el americio no es fácilmente soluble en el agua. Cuando se utiliza como fuente gamma de baja energía, la cápsula de acero inoxidable presenta una ventana delgada que permite que los fotones gamma se emitan sin una atenuación indebida [20].

En el caso de los detectores de humo y los pararrayos, puede presentarse sellado en un solo sobre (lámina metálica) o estar depositado en un soporte de cerámica y vitrificado.

Californio

El californio es un elemento actínido sin isótopos estables. Se produce por sucesivas capturas de neutrones en blancos de actínidos. El californio 252 tiene un período de semidesintegración de 2,645 años y se desintegra por fisión espontánea el 3,1 % del tiempo y por desintegración alfa en el 96,9 % restante de los casos. Las fisiones liberan neutrones, y por lo tanto el ^{252}Cf es una fuente de neutrones muy intensa ($2,3 \times 10^{12}$ neutrones por segundo por gramo). Debido a que un núcleo de ^{238}U debe absorber 14 neutrones sin sufrir otras reacciones que reduzcan el número de nucleones para producir un núcleo de ^{252}Cf , el californio se produce en cantidades muy pequeñas.

Selenio

El selenio es un elemento volátil, reactivo y corrosivo que se asemeja químicamente al azufre y que forma compuestos extremadamente tóxicos. Tiene una densidad moderada ($4,3 \text{ g/cm}^3$ a $4,8 \text{ g/cm}^3$) y se funde a $217 \text{ }^\circ\text{C}$. El selenio tiene varios isótopos naturales: ^{74}Se (0,89 %), ^{76}Se (9,36 %), ^{77}Se (7,63 %), ^{78}Se (23,78 %), ^{80}Se (49,61 %) y ^{82}Se (8,73 %). El selenio 75 se desintegra por captura de electrones con un período de semidesintegración de 119,8 días hasta convertirse en ^{75}As estable, que emite un promedio de 1,75 rayos gamma con una energía media de 215 keV cada uno, y una energía máxima de 800 keV. Se utiliza en las cámaras de radiografía para las estructuras de paredes delgadas. El selenio 75 se obtiene por la irradiación del isótopo natural ^{74}Se en un reactor nuclear. El dióxido de selenio, fácilmente oxidable, es muy soluble en agua. La toxicidad química del selenio es muy alta. Tiene un nivel de radiotoxicidad medio.

El polvo radiactivo de ^{75}Se se prensa en forma de pastillas y se coloca en una cápsula interior de titanio (o aleación de titanio) soldada. La cápsula de titanio se coloca en una cápsula exterior de acero inoxidable soldada.

Yodo

El yodo 125 se produce normalmente como resultado de la irradiación alfa del antimonio según la reacción $^{123}\text{S} (\alpha, 2n)^{125}\text{I}$. Tiene un breve período de semidesintegración de 60 días. Se desintegra por captura de electrones, lo que da lugar a la emisión de rayos X de baja energía de 27 y 35 keV.

Las fuentes de yodo que se utilizan para la braquiterapia consistirán normalmente en ^{125}I absorbido en una varilla de plata o en cuentas de resina de intercambio iónico, soldadas en una delgada cápsula de titanio. Cuando se utilizan con fines industriales, las fuentes adoptarán la forma de una cuenta de resina activa encerrada en una cápsula de acero inoxidable con una delgada ventana de titanio.

Dado que la fuente está construida con material activo absorbido en un sustrato, si se deteriora el encapsulamiento puede volatilizarse parte del radioyodo.

Plutonio

El plutonio es un elemento actínido o transuránico sin isótopos estables. Es un metal reactivo de color blanco plateado que se vuelve de un tono apagado y más oscuro cuando se oxida, lo que ocurre con facilidad. Tiene una baja solubilidad en agua pura, pero el agua salada y los ácidos halogenados lo atacan vigorosamente. El plutonio 238 se produce por absorción de neutrones en ^{237}Np , que a su vez se produce por la irradiación de uranio en un reactor seguida de separaciones químicas. El plutonio 238 tiene un período de semidesintegración de 87,7 años, y se desintegra por desintegración alfa con una energía media de 5,486 MeV. El producto de la desintegración, ^{234}U , es un radionucleido natural. El calor que genera la desintegración en ^{238}Pu relativamente puro

es tal que una esfera sólida del material del tamaño de una pelota de golf brillará en color rojo por la radiación térmica si no se enfría activamente.

En el cuadro 1 [19] se resumen las principales características radiológicas de los radionucleidos analizados que emiten radiación alfa/beta/gamma.

CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS DE DETERMINADOS RADIONUCLEIDOS EMISORES ALFA/BETA/GAMMA QUE SE UTILIZAN CON FRECUENCIA EN LAS FUENTES RADIATIVAS SELLADAS [19]

Características	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	¹⁹² Ir	²²⁶ Ra	²⁴¹ Am	⁹⁰ Sr (⁹⁰ Y)	⁷⁵ Se	¹²⁵ I
Período de semidesintegración	5,27 a	30 a	74 d	1600 a	433 a	29 a	120 d	60 d
Energía alfa (MeV)	—	—	—	7,7	5,86	—	—	—
Energía beta máxima (MeV)	0,31	1,2	0,67	2,8	—	0,55 (2,3)	—	—
Energía gamma (MeV)	1,17 1,33	0,66	0,32 0,47	Hasta 2,4	0,06	—	Nivel medio	0,03
Constante gamma (μ Sv/h \times GBq a 1 m)	360	86	140	220	4	3,5 (radiación de frenado)	39	39

Fuentes de neutrones

Las fuentes de neutrones contienen principalmente radionucleidos emisores alfa (²⁴¹Am, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu y ²²⁶Ra) para inducir reacciones (α , n) con elementos ligeros, por ejemplo, berilio, boro, litio o flúor. Un núcleo de berilio o boro absorberá una partícula alfa y emitirá un neutrón con una energía que va de 0 MeV a cerca de 11 MeV y una energía media de aproximadamente 4 MeV. Las fuentes neutrónicas de radionucleidos más utilizadas son las fuentes de Am-Be, aunque en el pasado se han utilizado algunas fuentes de plutonio-berilio (Pu-Be). Las fuentes de Am-Be, como las que se utilizan en la diagrafía de pozos petrolíferos, se suelen formar mediante mezclas de óxido de americio (AmO₂) y polvos de berilio prensadas en frío para formar una pastilla que luego se une por difusión a una tira de metal (para fuentes pequeñas) o se sella en un recipiente de acero inoxidable soldado.

Se ha demostrado que una fuente de fisión espontánea que utiliza ²⁵²Cf sustituye a las fuentes de Am-Be. El plutonio 238 se utiliza para inducir la emisión de neutrones rápidos, mientras que el ²⁴¹Am se emplea de forma generalizada para otras aplicaciones. El radio 226 también se utiliza en las fuentes de neutrones; sin embargo, presenta problemas debido a la radiación gamma asociada.

Las características radiológicas de las fuentes de neutrones más importantes se presentan en el cuadro 2 [17].

CUADRO 2. FUENTES DE NEUTRONES MÁS IMPORTANTES [17]

Fuente	Reacción nuclear	Período de semidesintegración	Rendimiento neutrónico 1/(TBq.s)	Energía media (MeV)
²²⁶ Ra-Be	⁹ Be(α , n) ¹² C	1602 a	$4,6 \times 10^8$	5
²³⁹ Pu-Be	⁹ Be(α , n) ¹² C	$2,44 \times 10^4$ a	$4,8 \times 10^7$	4
²⁴¹ Am-Be	⁹ Be(α , n) ¹² C	458 a	$5,7 \times 10^7$	4
²⁵² Cf	Fisión espontánea	2,64 a	$1,2 \times 10^{11}$	1

2.2. ESTRUCTURA Y DISEÑO

En función de las aplicaciones y el contenido de la actividad, las fuentes radiactivas selladas se pueden encontrar en distintas formas y dimensiones. Los parámetros geométricos son importantes a la hora de seleccionar métodos adecuados para el acondicionamiento, el transporte, el almacenamiento y la disposición final de las fuentes en desuso.

2.2.1. Fuentes gamma

La parte activa de la fuente radiactiva puede tener varias formas. Por lo que se refiere a la radiación beta-gamma, las partes activas pueden encontrarse en forma de cilindros, discos, gránulos, placas y cables. El material radiactivo de las fuentes gamma suele ser sólido y de baja solubilidad. Una excepción es el cloruro de ^{137}Cs en fuentes de actividad alta, que es fácilmente soluble. Por lo general, el acero inoxidable o, en menor medida, el aluminio y el titanio se utilizan para encapsular las fuentes gamma. La envoltura protectora de la fuente radiactiva sellada puede estar constituida por una o varias cápsulas (véase la figura 1). La mayoría de las fuentes de alta energía presentan un encapsulamiento doble; las fuentes de baja energía están encapsuladas en una sólida cápsula metálica con una ventana delgada. En las fuentes gamma de baja energía el material radiactivo se fija como una capa fina en la superficie de la placa (véase la figura 2).

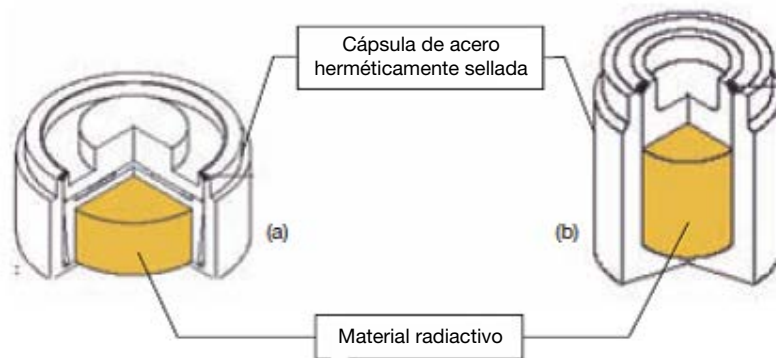


Fig. 1. Ejemplos de fuentes con encapsulamiento doble y sencillo: a) una típica fuente de disco de ^{241}Am y b) una típica fuente cilíndrica de ^{137}Cs .

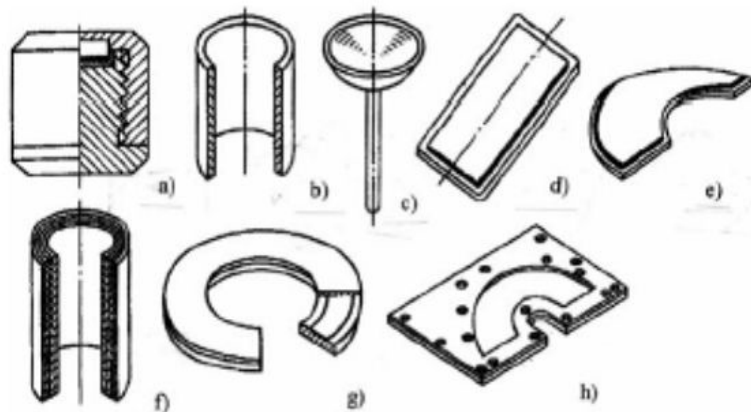


Fig. 2. Fuentes radiactivas fijadas a una superficie: a) fuentes beta con $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$, $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$; b) fuente alfa con Pu ; c) fuente beta con $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$; d) fuente alfa con Pu ; e) fuente beta con ^{147}Pm ; f) fuente beta con $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$; g) fuente de rayos X con ^{55}Fe ; h) fuentes beta con $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$.

2.2.2. Fuentes alfa

Por regla general, las fuentes alfa comprenden un medio cerámico o metálico que contiene radionucleidos, como ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{210}Po , ^{237}Np o ^{226}Ra . Las dimensiones de estas fuentes pueden variar significativamente. En la figura 3 se muestra una típica fuente radiactiva de tipo laminilla de ^{241}Am .

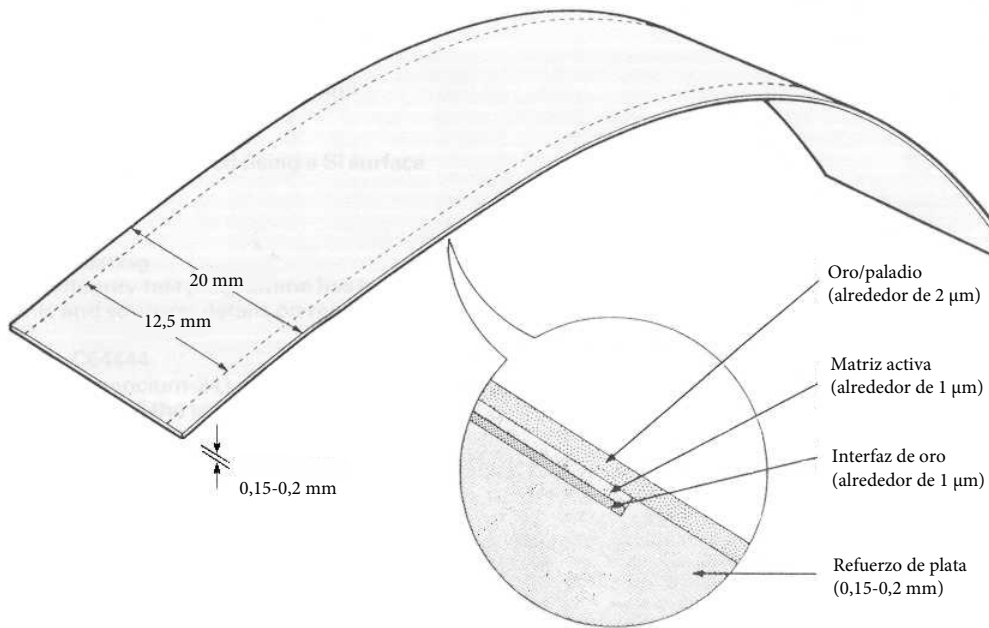


Fig. 3. Típica fuente radiactiva emisora alfa con ^{241}Am en una tira.

Algunas fuentes selladas alfa contienen material radiactivo en polvo o en forma líquida dentro de viales y ampollas de vidrio o plástico. Esas fuentes necesitan precauciones especiales durante la manipulación, el transporte, el acondicionamiento y el almacenamiento. Las primeras fuentes líquidas de radio se sellaban en viales de vidrio (figura 4), pero esa práctica se dejó de utilizar hace muchos años. No obstante, se siguen encontrando ese tipo de fuentes.



Fig. 4. Fuentes líquidas de ^{226}Ra en viales de vidrio.

2.2.3. Fuentes beta

El diseño de las fuentes beta comprende una cápsula metálica sólida con una ventana delgada o una superficie de sustrato inactivo donde se deposita el material activo, a menudo recubierto con una capa muy delgada e inactiva.

Las fuentes de níquel 63 se preparan sobre un sustrato de tubos metálicos o alambre, con una capa de material radiactivo depositada electroquímicamente. La longitud de esas fuentes no suele superar los 40 mm.

Las fuentes de carbono 14 consisten en películas poliméricas (metacrilato polimetílico) adheridas a una película de aluminio. Por lo general, esas películas no exceden los 70 mm de longitud y 1 mm de grosor.

Las fuentes de estroncio 90 suelen estar hechas de una matriz cerámica encapsulada en acero. No obstante, los aplicadores oftálmicos de ⁹⁰Sr se basan en la tecnología de la lámina de plata.

En cuanto a las fuentes de ⁸⁵Kr, el contenido radiactivo es un gas noble poco frecuente.

2.2.4. Fuentes de neutrones

Casi todas las fuentes de neutrones contienen un radionucleido emisor alfa mezclado con berilio u otro polvo de metal ligero que se prensa y se recubre dos veces en acero inoxidable. La longitud de las fuentes puede variar de 3 a 40 mm.

2.3. DIMENSIONES

Algunos ejemplos de las dimensiones de las fuentes radiactivas selladas figuran en el cuadro 3 [21].

CUADRO 3. DIMENSIONES HABITUALES DE ALGUNAS FUENTES SELLADAS [21]

Fuentes selladas	Categoría	Dimensiones
Fuente de teleterapia de Co-60	1	Cilindro de 20 mm de diámetro × 30 mm de longitud
Fuente de esterilización gamma de Co-60	1	11 mm de diámetro × 450 mm de longitud
Fuente de generador termoelectrico de radioisótopos de Sr-90	1	Hasta 100 mm de diámetro × 200 mm de longitud
Fuentes de gammagrafía industrial	2	Hasta 7 mm de diámetro × 15 mm de longitud; cola flexible de hasta 200 mm de longitud
Fuentes de braquiterapia de carga diferida a distancia de alta tasa de dosis	2	<i>Fuentes modernas:</i> Hasta 3 mm de diámetro × 15 mm de longitud; cola flexible de hasta 300 mm de longitud <i>Fuentes antiguas:</i> Esféricas: aprox. 3 mm de diámetro; actividad: Cs-137
Fuentes gamma de alta energía de calibradores industriales	3 o 4	Generalmente cápsulas cilíndricas: 3-12 mm de diámetro × 5-15 mm de longitud
Fuentes de neutrones de calibración industrial	3 o 4	3 o 4-6 mm de diámetro × 12 mm de longitud o 8-20 mm × 12-30 mm de longitud
Fuentes gamma y de neutrones utilizadas en diagrafía de pozos petrolíferos	2 o 3	<i>Fuentes gamma:</i> 8-20 mm de diámetro × 15-40 mm de longitud <i>Fuentes de neutrones:</i> 15-25 mm de diámetro × 25-60 mm de longitud
Fuentes de baja energía de calibradores industriales fijos	4	10-50 mm de diámetro × 7-15 mm de altura

CUADRO 3. DIMENSIONES HABITUALES DE ALGUNAS FUENTES SELLADAS [21] (cont.)

Fuentes selladas	Categoría	Dimensiones
Fuentes semilla de implante permanente y de braquiterapia de baja tasa de dosis	5	Menos de 1 mm de diámetro × menos de 5 mm de longitud
Placas oftálmicas	5	Menos de 1 mm de diámetro × menos de 5 mm de longitud
Fuentes analíticas gamma de baja energía	5	3-15 mm de diámetro × 7-10 mm de altura
Fuentes de calibración y de referencia	5	Varios tamaños y formas

Hay aplicaciones específicas en las que las fuentes son de gran tamaño, por ejemplo, los eliminadores de electricidad estática que tienen más de 1 m de longitud. La configuración geométrica de algunos de estos dispositivos es bastante complicada en el sentido de que el material de la fuente radiactiva está distribuido por la superficie de la estructura.

2.4. ESTADO FÍSICO

Algunas fuentes radiactivas selladas pueden tener fugas y es necesario someterlas a pruebas a intervalos regulares recomendados por el fabricante o exigidos por la autoridad reguladora nacional. Esas pruebas deben ser realizadas por personal debidamente capacitado. La orientación sobre los métodos de prueba de fugas figura en la referencia sobre la norma internacional ISO [22].

Las fuentes con fugas se consideran en desuso y se retiran inmediatamente de servicio para su gestión segura. Por ejemplo, las viejas fuentes de radio, encapsuladas en ampollas de platino o de vidrio, pueden tener fugas. El aumento de la presión interna, a consecuencia de la acumulación de productos de desintegración de ^{226}Ra , es una preocupación habitual en materia de seguridad. Las fuentes con fugas o dañadas necesitan una atención especial durante el acondicionamiento y el almacenamiento.

3. CATEGORIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN

La categorización, o clasificación, es un enfoque que se utiliza principalmente cuando la cantidad de elementos considerados (objetos o ideas) es grande, para facilitar la gestión de los elementos al reducir su número. La categorización se realiza mediante la selección de las características principales (criterios) y la estructuración de esos criterios. Las fuentes radiactivas selladas se utilizan para distintos fines e incorporan una amplia gama de radionucleidos y cantidades de material radiactivo. En este caso particular, la categorización se basa principalmente en las características de la radiación y el riesgo que representa la fuente para los seres humanos y el medio ambiente. En el anexo se describen brevemente algunos riesgos asociados a las fuentes radiactivas.

3.1. FUNDAMENTOS DE LA CATEGORIZACIÓN DE LAS FUENTES RADIATIVAS

La categorización o clasificación de las fuentes radiactivas puede ser útil en cualquier etapa del ciclo de vida de una fuente radiactiva, desde su fase inicial de producción y utilización hasta su disposición final. También se necesita un sistema de categorización de fuentes para proporcionar una clasificación y agrupación de las fuentes y sus aplicaciones en función de los riesgos, lo que a su vez guarda relación directa con las siguientes cuestiones:

- *Medidas reglamentarias.* Proporcionar una base lógica y transparente para un sistema de notificación, registro, concesión de licencias e inspecciones basado en el riesgo. La categorización también proporciona una base para asegurar que la asignación de recursos humanos y financieros sea proporcional a los riesgos asociados al uso de la fuente.
- *Medidas de seguridad.* Proporcionar una base con conocimiento de los riesgos para determinar las medidas de seguridad que se aplicarán durante el ciclo de vida de la fuente sellada (desde el estado de uso hasta su disposición final en desuso). Evaluar los posibles peligros asociados a los diversos tipos de fuentes.
- *Opciones de gestión.* Ayudar a planificar y diseñar las instalaciones de acondicionamiento y almacenamiento y a tomar una decisión sobre la posible vía de disposición final de una fuente.
- *Medidas de seguridad física.* Proporcionar una base con conocimiento de los riesgos para contribuir a la definición de las medidas de seguridad física, reconociendo que hay otros factores importantes (por ejemplo, las amenazas contra instalaciones o fuentes específicas).
- *Registro nacional de fuentes.* Optimizar las decisiones sobre las categorías de fuentes y el nivel de detalle que se ha de incluir en los informes nacionales.
- *Controles de importación y exportación.* Optimizar las decisiones relativas a las fuentes que pueden estar sujetas a controles de importación y exportación.
- *Etiquetado de las fuentes.* Optimizar las decisiones relativas a las fuentes que pueden marcarse con una etiqueta apropiada (aparte del símbolo del trébol) para advertir a las personas del peligro de radiación.
- *Preparación y respuesta para casos de emergencia.* Garantizar que los planes de preparación para casos de emergencia y la respuesta a los accidentes estén en consonancia con la categoría de la fuente.
- *Fijar un orden de prioridad para recuperar el control de las fuentes huérfanas.* Optimizar las decisiones relativas a los aspectos en los que hay que concentrar los esfuerzos para recuperar el control de las fuentes huérfanas.
- *Comunicación con el público.* Proporcionar una base para explicar el peligro relativo de los sucesos en los que hay fuentes radiactivas vinculadas.

El propósito de la categorización de las fuentes radiactivas es proporcionar una base fundamental e internacionalmente armonizada para la adopción de decisiones con conocimiento de los riesgos. Las organizaciones internacionales han elaborado diversos sistemas de categorización de fuentes, pero estos se han concebido para diferentes fines de adopción de decisiones. A continuación se describen los tres principales sistemas internacionales de categorización creados para fundamentar las estrategias de gestión de las fuentes radiactivas en desuso. Además, para aquellos Estados Miembros que estén considerando opciones de disposición final, en la sección 12 se describe el sistema de clasificación de desechos del OIEA.

Los Estados Miembros que no cuentan con un sistema de clasificación (o categorización) de fuentes pueden elaborar su sistema propio a partir de la orientación internacional pertinente o pueden adoptar los sistemas internacionales de categorización de fuentes existentes para cumplir requisitos nacionales específicos.

3.2. EL SISTEMA DE CATEGORIZACIÓN DE FUENTES DEL OIEA

Reconociendo la necesidad de un enfoque basado en el riesgo para el control reglamentario de las fuentes radiactivas, el OIEA proporciona un esquema de categorización para las fuentes y prácticas radiactivas en las NBS [11] y en la Guía de Seguridad RS-G.1.9 [23], que se basa en el documento IAEA-TECDOC-1344 [24].

En el cuadro 2 del apéndice I de la referencia [23] figuran varios ejemplos de la amplia gama de radionucleidos y actividades en fuentes radiactivas que se utilizan con fines beneficiosos en todo el mundo. Reconociendo que la salud humana es de importancia primordial, el sistema de categorización se basa principalmente en la posibilidad de que las fuentes radiactivas causen efectos deterministas en la salud, teniendo en cuenta tanto las propiedades físicas como la aplicación específica de la fuente. Por lo tanto, el sistema de categorización se basa en el concepto de “fuentes peligrosas”, que se cuantifican en valores D^2 . El valor D es la actividad específica de los radionucleidos de una fuente que, de no hallarse bajo control, podría causar graves efectos deterministas en diversas circunstancias hipotéticas, entre ellas la exposición externa procedente de una fuente no blindada y la exposición interna a raíz de la dispersión del material de la fuente (véase el anexo II de la referencia [24]). Respecto de cada práctica y radionucleido que se utiliza en la práctica, se divide la actividad de la fuente en TBq por el correspondiente valor D específico del radionucleido en TBq, lo que da como resultado la proporción normalizada adimensional de A/D .

La categorización final de las aplicaciones de fuentes específicas figura en el cuadro 4 (cuadro 1 de la referencia [23]), y una comparación de las categorías, basada únicamente en la proporción A/D , con las asignadas a las prácticas se presenta en el apéndice I de la referencia [23]. Las fuentes de la categoría 1 demuestran el mayor riesgo en la manipulación de fuentes selladas, mientras que la categoría 5 se refiere al menor riesgo.

CUADRO 4. CATEGORÍAS RECOMENDADAS PARA FUENTES UTILIZADAS EN PRÁCTICAS COMUNES [23]

Categoría	Categorización de las prácticas comunes ^a	Proporción de la actividad ^b (A/D)
1	Generadores termoeléctricos de radioisótopos Irradiadores Fuentes de teleterapia Fuentes de teleterapia fija de haces múltiples (cuchillo gamma)	$A/D \geq 1000$
2	Fuentes de gammagrafía industrial Fuentes de braquiterapia de elevada/media tasa de dosis	$1000 > A/D \geq 10$
3	Calibradores industriales fijos con fuentes de actividad alta Calibradores para diagrfía de pozos	$10 > A/D \geq 1$
4	Fuentes de braquiterapia de baja tasa de dosis (salvo placas oftálmicas e implantes permanentes) Calibradores industriales sin fuentes de actividad alta Densitómetros de huesos Eliminadores de estática	$1 > A/D \geq 0,01$

² Originalmente, se derivaron los valores D en el contexto de la preparación para emergencias [38] a fin de establecer un punto de referencia que correspondiera a una “fuente peligrosa” [37] en una escala de los riesgos que podrían proceder de fuentes no controladas.

CUADRO 4. CATEGORÍAS RECOMENDADAS PARA FUENTES UTILIZADAS EN PRÁCTICAS COMUNES [23] (cont.)

Categoría	Categorización de las prácticas comunes ^a	Proporción de la actividad ^b (A/D)
5	Fuentes de braquiterapia de baja tasa de dosis, placas oftálmicas e implantes permanentes Aparatos de análisis mediante fluorescencia por rayos X (FRX) Aparatos detectores por captura de electrones Fuentes de espectrometría Mössbauer Fuentes de examen mediante tomografía por emisión de positrones (TEP)	0,01>A/D≥exim. ^c /D

^a Reconociendo que se han tenido en cuenta otros factores distintos de A/D.

^b Se puede utilizar esta columna para determinar la categoría de una fuente basándose únicamente en A/D, método que puede ser adecuado, por ejemplo, si no se conoce la práctica, o no figura en la lista; si las fuentes tienen un período de semidesintegración breve y/o no están selladas, o bien si se han sumado las fuentes.

^c Las cantidades eximidas figuran en la Lista I de las NBS [11].

Si una práctica supone la suma de fuentes en un solo lugar de almacenamiento o utilización en el que las fuentes se encuentran muy próximas, como en instalaciones de almacenamiento, procesos de fabricación o transporte, la actividad total puede sumarse y tratarse como una sola fuente a los efectos de asignar una categoría. Por lo tanto, la actividad total sumada del radionucleido se puede dividir por el valor *D* adecuado, y la proporción *A/D* calculada con las proporciones *A/D* que figuran en la columna de la derecha del cuadro 4, lo que permite asignar una categoría a la práctica basándose en la actividad. Si se suman fuentes con diversos radionucleidos, se puede utilizar la suma de las proporciones *A/D* para determinar la categoría, de conformidad con la fórmula:

$$\text{Suma de } A/D = \sum_n = \sum_i A_{i,n}/D_n$$

en que

$A_{i,n}$ es la actividad de cada fuente *i* del radionucleido *n*;

D_n es el valor *D* para el radionucleido *n*.

En cada caso se debería reconocer que puede ser menester tomar en cuenta otros factores al asignar una categoría. Además, al considerar la suma de las fuentes, es importante reconocer que la práctica puede cambiar, por ejemplo, la “fabricación” de un calibrador de nivel es una práctica diferente de la “utilización” de dicho calibrador.

3.3. AGRUPACIÓN DE FUENTES ELABORADA POR EL OIEA EN FUNCIÓN DE LA SEGURIDAD FÍSICA

Las fuentes en condiciones no seguras han causado muertes y lesiones graves en muchas partes del mundo. El OIEA ha publicado varios informes que describen las consecuencias para la salud humana, así como las pérdidas económicas de los incidentes y accidentes, a raíz de las fuentes incontroladas.

Antes del 11 de septiembre de 2001, la seguridad física de las fuentes radiactivas se abordaba principalmente mediante medidas que protegían a las fuentes del acceso de personal insuficientemente capacitado o de los intentos de robo con fines de lucro. Ese supuesto ha cambiado ahora para incluir también la necesidad de impedir el acceso a determinadas fuentes de personas que tratan deliberada y malintencionadamente de causar exposición radiológica o dispersión de materiales radiactivos.

Para garantizar la seguridad física de las fuentes es necesario aplicar medidas con miras a impedir el acceso no autorizado a las fuentes radiactivas en todas las etapas de su ciclo de vida, así como la pérdida, el robo y la transferencia no autorizada de las fuentes. A fin de garantizar la seguridad tecnológica de las fuentes radiactivas, es necesario controlar la exposición a la radiación de las fuentes, tanto directamente como a consecuencia de los

incidentes, de modo que la probabilidad de que se produzcan daños atribuibles a dicha exposición sea muy baja. Los aspectos de la seguridad tecnológica y la seguridad física de las fuentes están estrechamente relacionados y muchas de las medidas para afrontar una cuestión también servirán para abordar la otra.

El OIEA publicó en 2009 una guía de aplicación sobre la seguridad física de las fuentes radiactivas [25], en la que se tiene en cuenta el enfoque general de seguridad física establecido en esa publicación que algunos Estados pueden haber utilizado como referencia al elaborar sus regímenes de seguridad física actuales. En la guía se propone un enfoque graduado de la seguridad física mediante un conjunto de niveles, y las funciones de la seguridad física de disuasión, detección, demora, respuesta y gestión de la seguridad física. La publicación se ha armonizado con las categorías de fuentes radiactivas del OIEA [23], los requisitos de las NBS [11] y los requisitos del Código de Conducta [14]. Se han establecido tres niveles de seguridad (A, B y C) para poder especificar el comportamiento de los sistemas de seguridad física de manera graduada. El nivel A corresponde al grado más alto de seguridad física, y los otros niveles, a una seguridad física progresivamente menor.

Cada nivel tiene su propia meta. La meta define el resultado global que el sistema de seguridad física debería ser capaz de ofrecer para un determinado nivel de seguridad física. Se han fijado las siguientes metas:

- Nivel de seguridad física A: *Impedir* la retirada no autorizada de una fuente.
- Nivel de seguridad física B: *Reducir al mínimo la probabilidad* de la retirada no autorizada de una fuente.
- Nivel de seguridad física C: *Reducir la probabilidad* de la retirada no autorizada de una fuente.

Los actos dolosos pueden entrañar ya sea la retirada no autorizada de una fuente o su sabotaje. Aunque las metas de seguridad física solo se refieren a la retirada no autorizada, su logro reducirá también la probabilidad de éxito de un acto de sabotaje. Los sistemas de seguridad física que cumplan las metas señaladas ofrecerán cierta capacidad (aunque limitada) de detectar un acto de sabotaje y de poner en marcha una respuesta.

Debería asignarse un nivel de seguridad física adecuado a cada categoría de fuentes radiactivas que se especifican en la sección 3.2.³ Las fuentes de la categoría 1 deberían tener medidas de seguridad física que permitan cumplir los objetivos de seguridad física del nivel A. Las fuentes de la categoría 2 deberían tener medidas de seguridad física que permitan cumplir los objetivos de seguridad física del nivel B. Las fuentes de la categoría 3 deberían tener medidas de seguridad física que permitan cumplir los objetivos de seguridad física del nivel C.

En las NBS [11] se establecen los requisitos generales para la seguridad física de las fuentes radiactivas. En la guía se considera que, aunque esas medidas de control proporcionan un nivel de seguridad física suficiente para las fuentes radiactivas de las categorías 4 y 5, en el caso de las categorías 1, 2 y 3 deberían aplicarse las medidas reforzadas especificadas en la guía para reducir la probabilidad de actos dolosos en relación con esas fuentes. Además, el órgano regulador, teniendo en cuenta la amenaza nacional, podría decidir reforzar la seguridad física de las fuentes de las categorías 4 y 5, cuando sea el caso. El uso doloso de fuentes radiactivas puede no limitarse a las fuentes de las categorías más altas en este sistema de clasificación. Por ejemplo, la mayoría de las fuentes de la categoría 1 tendrán blindaje y se encontrarán dentro de instalaciones o dispositivos fijos. La retirada de estas fuentes requeriría tiempo y podría exponer a los adversarios a un nivel considerablemente nocivo de radiación. Por lo tanto, es posible que los adversarios se centren en las fuentes de categorías más bajas, que son más accesibles, se pueden manipular con menos peligro, y son portátiles y más fáciles de ocultar. La asignación de una fuente radiactiva a un grupo de seguridad física es más eficaz si se utilizan los resultados de la evaluación de la amenaza. De esa forma es posible una mayor flexibilidad y especificidad para tener en cuenta la variabilidad de los niveles de amenaza y los entornos de seguridad física dentro de los Estados Miembros. También posibilita diferentes opciones de grupos de seguridad física para las fuentes en las diversas etapas de su ciclo de vida. Otra posibilidad es que algunos Estados Miembros realicen evaluaciones de la amenaza y la vulnerabilidad en todo el país y, en consecuencia, asignen fuentes a los grupos de seguridad física, sobre la base de esas evaluaciones.

De acuerdo con el Código de Conducta [14], cada una de las categorías incluye el material radiactivo liberado por fuga o rotura de alguna de las fuentes del grupo. La metodología de categorización también permite la agregación de fuentes en un solo lugar. Una razón para clasificar una fuente en un nivel más alto de seguridad física

³ Las orientaciones que se ofrecen en las oraciones con el verbo “debería”, o simplemente en presente de indicativo, para describir las buenas prácticas, representan la opinión de los expertos, pero no constituyen recomendaciones de consenso internacional sobre cómo cumplir los requisitos pertinentes.

podría ser que la evaluación de la amenaza específica ponga de manifiesto que algunas instalaciones con fuentes o algunas fuentes móviles son más vulnerables a la adquisición, aunque no sean las fuentes de mayor actividad.

3.4. CLASIFICACIÓN ISO DE LAS FUENTES

La norma ISO 2919 [26] de la Organización Internacional de Normalización (ISO) establece un sistema de clasificación de las fuentes selladas basado en la realización de pruebas. La norma especifica los requisitos generales, las pruebas de funcionamiento, las pruebas de producción, el marcado y la certificación. Los prototipos de las fuentes se someten a pruebas de temperatura, presión externa, impacto, vibración y punción en grados de severidad creciente [22]. Las fuentes destinadas a una aplicación deben cumplir los criterios mínimos indicados en la norma.

La clasificación ISO de las fuentes, basada en el tipo de radiación y la aplicación, es la siguiente:

- fuentes gamma;
- fuentes beta;
- fuentes alfa;
- fuentes de neutrones;
- otras fuentes de uso especial (por ejemplo, fuentes gamma y de neutrones para perfiles de sondeo).

Cabe señalar que las fuentes suelen emitir una radiación mixta: La desintegración radiactiva va acompañada de radiación, y los descendientes de la desintegración radiactiva suelen ser emisores beta. Además, la conversión de la energía de la partícula (electrón) durante la absorción da lugar a radiación de frenado.

4. APLICACIONES, DISPOSITIVOS Y FUENTES SELLADAS ASOCIADAS

En casi todas las aplicaciones, las fuentes radiactivas están contenidas en un soporte blindado que también contiene otros instrumentos o equipos mecánicos o está asociado a ellos. Ese aparataje se denomina generalmente “dispositivo”. La índole del dispositivo depende de la aplicación. En muchos casos, el dispositivo también se utiliza para el transporte de la fuente sellada a su lugar de uso previsto. El dispositivo generalmente incorpora un blindaje suficiente para absorber la radiación a un nivel en el que es inofensivo para el público, y un “obturador” que permite que salga un haz de radiación de la fuente hacia el sujeto cuando se abre el obturador.

En la siguiente sección se describen algunos dispositivos típicos y las fuentes asociadas que se utilizan en diversas aplicaciones. La descripción de los diversos dispositivos está vinculada a la *Clasificación de las fuentes radiactivas* del OIEA [23]. Dado que las fuentes radiactivas se han utilizado intensamente con diversos fines en el pasado, es importante tener en cuenta las aplicaciones históricas de las fuentes junto con los dispositivos utilizados en ese momento.

4.1. DISPOSITIVOS Y FUENTES DE LA CATEGORÍA 1

4.1.1. Generadores termoeléctricos de radioisótopos

Los generadores termoeléctricos de radioisótopos son dispositivos que utilizan el calor de la desintegración de un radioisótopo por la absorción de la radiación de la fuente radiactiva para generar electricidad mediante un dispositivo de termopar. Los dos radionucleidos que se han utilizado con mayor frecuencia son ^{90}Sr (330 TBq — $2,5 \times 10^4$ TBq) y ^{238}Pu (1-10 TBq). Las fuentes tienen un diámetro de hasta 100 mm y una longitud de 200 mm. El estroncio se utiliza en forma de titanato cerámico (SrTiO_3) y se sella herméticamente en dos ocasiones en una cápsula mediante soldadura de argón. En varios generadores termoeléctricos de radioisótopos se utilizó ^{90}Sr en forma de vidrio de borosilicato de estroncio. La cápsula está protegida contra los impactos externos por la gruesa capa del generador termoeléctrico de radioisótopos, que está compuesta de acero inoxidable, aluminio y plomo.

La radiación principal es la radiación beta, que es relativamente de corto alcance, pero la fuente también genera un nivel peligroso y significativo de radiación gamma secundaria de radiación de frenado. La potencia que se genera habitualmente puede variar desde unos pocos vatios hasta decenas de kW, en función del nivel de actividad y el tipo de radioisótopo utilizado. No hay partes móviles en estos dispositivos, que están diseñados para funcionar sin vigilancia durante decenas de años.

Hay dos aplicaciones clave: los viajes espaciales y la generación de energía en lugares remotos. Los Estados Unidos y la antigua Unión Soviética desplegaron generadores termoeléctricos de radioisótopos de forma bastante amplia en la región del Ártico para alimentar faros y balizas de navegación.

El tipo de generador termoeléctrico de radioisótopos que se producía en la antigua Unión Soviética aparece en la figura 5 a). En total, se han producido más de 1000 generadores termoeléctricos de radioisótopos, de los que 700 siguen en uso. En la figura 5 b) se puede observar un generador termoeléctrico de radioisótopos de los Estados Unidos.

Hasta la década de 1970 se utilizaron en los marcapasos generadores termoeléctricos de radioisótopos muy pequeños basados en ^{238}Pu para proporcionar energía de por vida (figura 6). Estos se han vuelto obsoletos por la mejora de la tecnología de las baterías, y debido a preocupaciones de seguridad y reglamentarias. Las fuentes son de actividad baja, lo que significa que esos dispositivos no suscitan gran preocupación.

El hecho de que estos dispositivos se desplieguen en regiones remotas significa que son susceptibles de que la gente los mueva, los adquiera con fines dolosos o los desmantele por el valor de chatarra de su material de blindaje. Además, los cambios de gobierno o la pérdida de registros dan lugar a que las fuentes puedan quedar abandonadas y olvidadas hasta que se redescubran tiempo después. Los satélites espaciales que contienen generadores termoeléctricos de radioisótopos también han vuelto a entrar en la atmósfera de la Tierra, lo que causa preocupación por la propagación del material radiactivo.

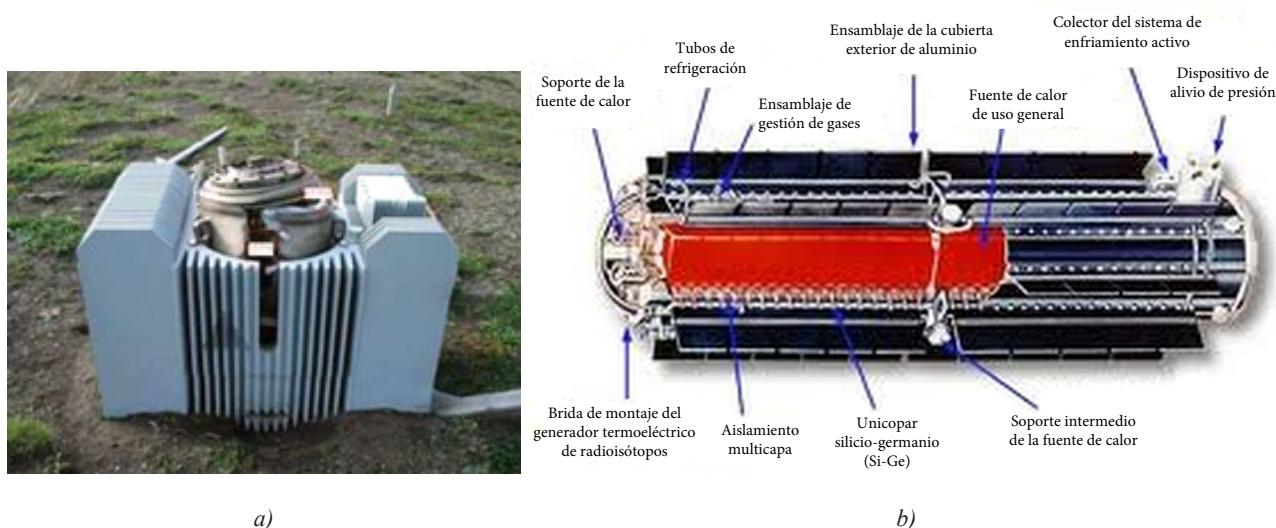


Fig. 5. Generadores termoelectricos de radioisotopos.



Fig. 6. Marcapasos alimentado por un generador termoelectrico de radioisotopos.

4.1.2. Irradiadores

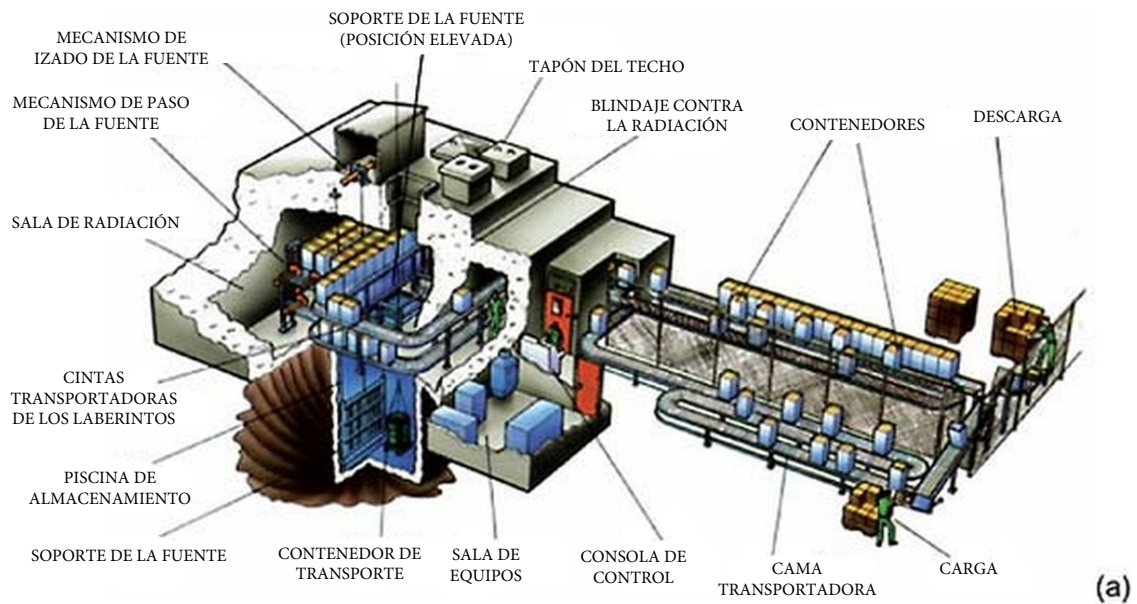
Irradiadores panorámicos o de esterilización

La planta de esterilización por rayos gamma, o “irradiador panorámico”, no es en rigor un dispositivo. Es un edificio blindado en el que un gran número de fuentes de ^{60}Co o ^{137}Cs (en el rango de 0,2 a 600 PBq) están alojadas en un conjunto. El producto que requiere esterilización con radiación gamma se coloca en la zona protegida y se expone a las fuentes durante el período necesario a fin de administrar la dosis de rayos gamma necesaria para matar las bacterias. Las aplicaciones incluyen la esterilización de artículos médicos (como agujas, jeringas y guantes), la conservación de alimentos y la reticulación de polímeros para mejorar sus propiedades. Actualmente, hay más de 160 irradiadores panorámicos en funcionamiento en todo el mundo.

Las fuentes que se utilizan en los irradiadores varían en tamaño, que puede ser desde grande hasta como un lápiz. Esas fuentes se instalan en recintos específicos, grandes y blindados que emplean ya sea una piscina profunda de agua (figura 7), o plomo macizo u hormigón para blindar la fuente cuando no está en uso (figura 8). Cuando la fuente queda expuesta, la tasa de dosis dentro del recinto de irradiación es muy alta y se podría recibir una dosis letal en cuestión de un minuto, aproximadamente. Por lo tanto, esas instalaciones tienen varias características de seguridad, basadas en los principios de redundancia, diversidad e interdependencia de los sistemas de seguridad.



Fig. 7. Almacenamiento en húmedo de fuentes de la categoría 1 en la piscina de agua.



(a)



(b)

Fig. 8. a) Diseño de un dibujante de un irradiator panorámico MDS Nordion JS-10000, que utiliza un soporte de fuente de tipo panel (no necesariamente a escala); y b) diferentes soportes de fuentes de un irradiator de palés MDS Nordion.

Las fuentes utilizadas en los irradiadores de esterilización suelen estar doblemente encapsuladas en una cápsula exterior de acero inoxidable, que contiene pastillas de ^{60}Co . El rango habitual de las dimensiones de las cápsulas es principalmente de 11 mm de diámetro \times 450 mm de longitud. El diseño más común de la fuente de esterilización por rayos gamma de ^{60}Co es el Nordion C188 (Canadá) o REVISS RSL2089 (consorcio internacional), que se utiliza en plantas industriales de esterilización por rayos gamma en todo el mundo. Otros fabricantes producen fuentes de dimensiones similares y también hay otros tipos de diseño, que se utilizan tanto en los irradiadores industriales como en los irradiadores en pequeña escala.

Las fuentes encapsuladas en tubos de acero inoxidable se llaman fuentes “lápiz” o “varilla”. En la figura 9 se reproduce un diagrama de una fuente lápiz gamma de ^{60}Co . En la figura 10 aparece una fuente industrial de actividad alta con forma de varilla.

Estas fuentes se fabrican de acuerdo con la norma ISO y otras normas [21, 27] y están etiquetadas en la superficie con un código grabado para su identificación. El código también se proporciona en el certificado de origen.

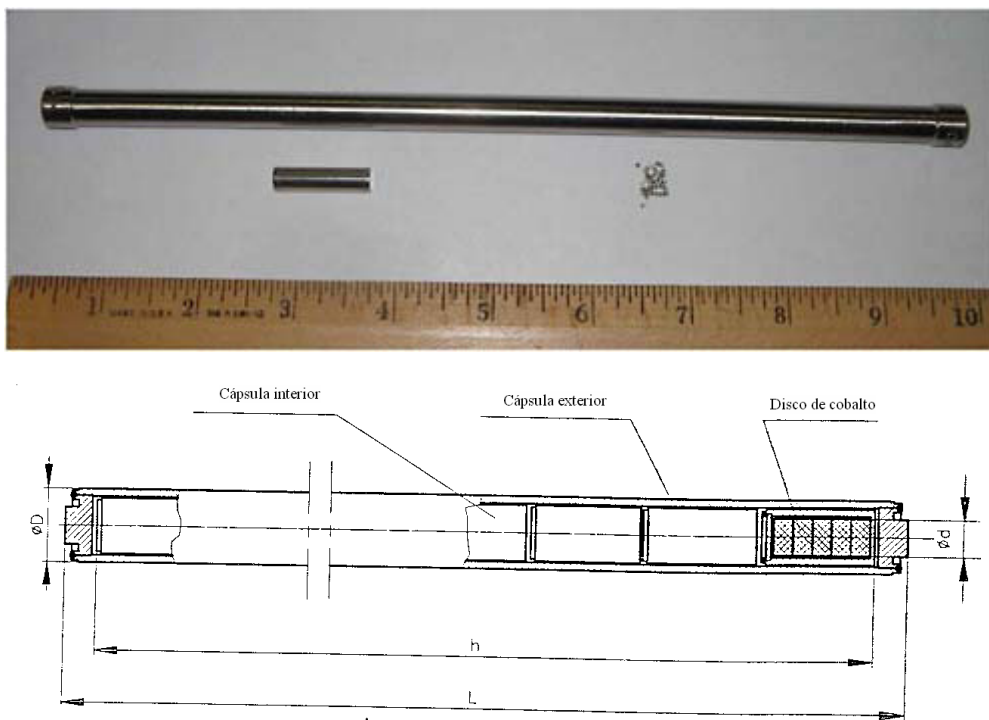


Fig. 9. Fuente lápiz de ^{60}Co .

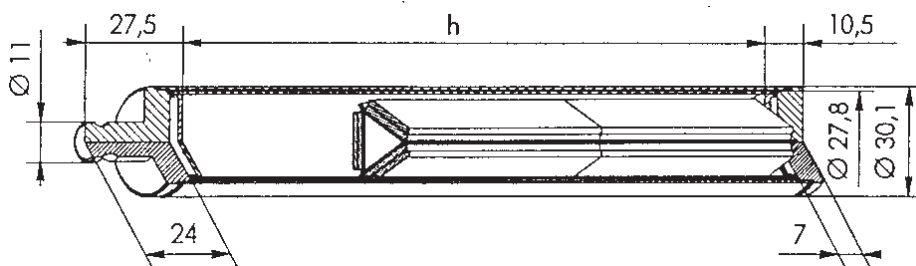


Fig. 10. Fuente industrial de actividad alta de tipo varilla.

Si las fuentes lápiz se producen mediante reciclado, su forma y dimensiones podrían ser diferentes de las fuentes que tienen esa forma originalmente. La actividad nominal inicial de un lápiz es de 18,5 TBq (500 Ci) a 450 TBq (12 000 Ci). La vida útil que se recomienda normalmente es de 15 a 20 años.

Si las instalaciones de irradiación no se someten a un mantenimiento adecuado, existe la posibilidad de que los objetos interfieran con el movimiento del conjunto de fuentes y distorsionen los marcos de los módulos, lo que hace posible que una fuente lápiz se caiga. Esa situación ha ocurrido en varias ocasiones. Proporciona el potencial para que una fuente lápiz caiga en uno de los “contenedores” que transportan el producto que se está irradiando fuera de la instalación. Los irradiadores modernos han instalado sistemas de vigilancia en los puntos de salida de los productos para detectar tal situación.

Otra consideración es que, de vez en cuando, un porcentaje de las fuentes lápiz tiene que ser sustituido debido a la desintegración radiactiva. Normalmente, los proveedores de las fuentes se encargarían de esa labor, y las antiguas fuentes se pondrían en contenedores de transporte especialmente diseñados para su devolución. En esta etapa, existe la posibilidad de que los problemas de transporte causen demoras, lo que daría lugar a que el contenedor fuera almacenado y posiblemente quedara olvidado.

4.1.2.1. Irradiadores autoblandados

Hay varios irradiadores más pequeños que se han descrito invariablemente como irradiadores autoblandados (o autónomos), o irradiadores de sangre/tejidos. Aunque son de menor tamaño, todavía contienen fuentes de actividad alta. En la figura 11 se muestra un ejemplo de ese tipo de irradiador. El irradiador de sangre de estilo antiguo se muestra en la figura 12. Estos dispositivos se utilizan para el tratamiento de la sangre y consisten en una cámara blindada con una cavidad en la que se carga una muestra de sangre en una bolsa de unos 2 litros de capacidad. Los hospitales y los bancos de sangre irradian los productos sanguíneos para prevenir la enfermedad de injerto contra huésped asociada a la transfusión. Esta dolencia es una complicación mortal de la transfusión que se produce cuando algunos glóbulos blancos del donante atacan los tejidos del receptor.

Además de esterilizar la sangre, los tejidos y las semillas, los irradiadores se utilizan para la coloración de las piedras preciosas, la esterilización del equipo médico, la irradiación de insectos y la investigación de los efectos de las mutaciones en los productos agrícolas. Generalmente, el diseño incluye una cámara de muestras con puertas enclavadas y las fuentes se mueven alrededor de la cámara o la cámara se coloca junto a las fuentes. No hay una forma sencilla de acceder a las fuentes; ahora bien, el irradiador, con algunas modificaciones, puede servir también como contenedor de transporte de la fuente.

Algunos dispositivos, incluidos algunos tipos de dosímetros y detectores de radiación, necesitan una calibración de la irradiación que sea a la vez precisa y exacta a dosis altas. Algunas fuentes de calibración utilizadas para estos fines también se consideran irradiadores autoblandados. Las fuentes de radionucleidos se utilizan normalmente para ese fin porque la energía de desintegración (y la tasa de desintegración) es conocida o se puede calcular fácilmente. Esos irradiadores de calibración son, en promedio, fuentes de menor actividad que los otros irradiadores autoblandados, pero algunos contienen unos 80 TBq (2200 Ci) de ^{137}Cs .

Hay algunos fabricantes de dispositivos de irradiación autoblandados que siguen operativos hoy en día, como: MDS Nordion de Canadá; CIS-US, Inc., empresa francesa que ya no fabrica máquinas nuevas pero que sigue dando servicio a las existentes, y una empresa estadounidense, J.L. Shepherd and Associates. Hay 1341 irradiadores autoblandados que utilizan fuentes radiactivas solo en los EE. UU., aproximadamente el 85 % de los cuales utilizan ^{137}Cs , mientras que casi todos los dispositivos restantes utilizan ^{60}Co . Entre ellos hay irradiadores de sangre, irradiadores de investigación e irradiadores de calibración.

Pocos de los dispositivos fijos han estado involucrados en incidentes debido a su carácter robusto y su diseño.

Aunque la mayoría de esos irradiadores son fijos, hay algunos dispositivos, como los irradiadores “Gamma Kolos”, que se montaron en camiones pesados o en remolques y se desplazaron por toda la antigua Unión Soviética con el fin de irradiar las semillas mientras se plantaban. La mayoría de esos dispositivos ya han sido retirados de sus vehículos y están actualmente almacenados (figura 13).



Fig. 11. Irradiador autoblandado típico.



Fig. 12. Irradiador de sangre de estilo antiguo.



Fig. 13. Irradiadores móviles de cesio utilizados en la antigua Unión Soviética.

4.1.3. Máquinas de teleterapia

Los aparatos de teleterapia se utilizan normalmente en instituciones médicas, como hospitales o clínicas. La radioterapia emplea radiaciones ionizantes dirigidas al cuerpo del ser humano o de un animal para tratar muchas enfermedades graves, sobre todo el cáncer. Las fuentes de radionucleidos de actividad alta pueden utilizarse para crear haces de radiación ionizante clínica en forma de rayos gamma de alta energía en máquinas de teleterapia que se emplean para radioterapia externa. Solo cuatro radionucleidos conocidos poseen características que los hacen plausibles para su uso en la radioterapia externa: ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu y ^{226}Ra . El europio 152 no se ha desarrollado todavía para su uso clínico, y el uso del ^{137}Cs y el ^{226}Ra se suspendió por razones prácticas y por motivos de seguridad. El cobalto 60 se utiliza actualmente en dispositivos de radioterapia externa que se encuentran principalmente en los países en desarrollo.

La fuente radiactiva, que es relativamente pequeña en tamaño, está ubicada de forma segura en la pesada cubierta protectora blindada del extremo del brazo giratorio (figura 14). El haz de radiación de la fuente se expone cuando se abre un obturador durante el uso. Al ser reemplazado el ^{137}Cs por el ^{60}Co , se hizo necesario renovar las fuentes a intervalos regulares, normalmente cada cinco o siete años, debido al período de semidesintegración relativamente corto del ^{60}Co . Por consiguiente, el equipo de teleterapia se diseñó para permitir que la fuente se retirara del cabezal y se transfiriera a contenedores de transporte blindados *in situ*.

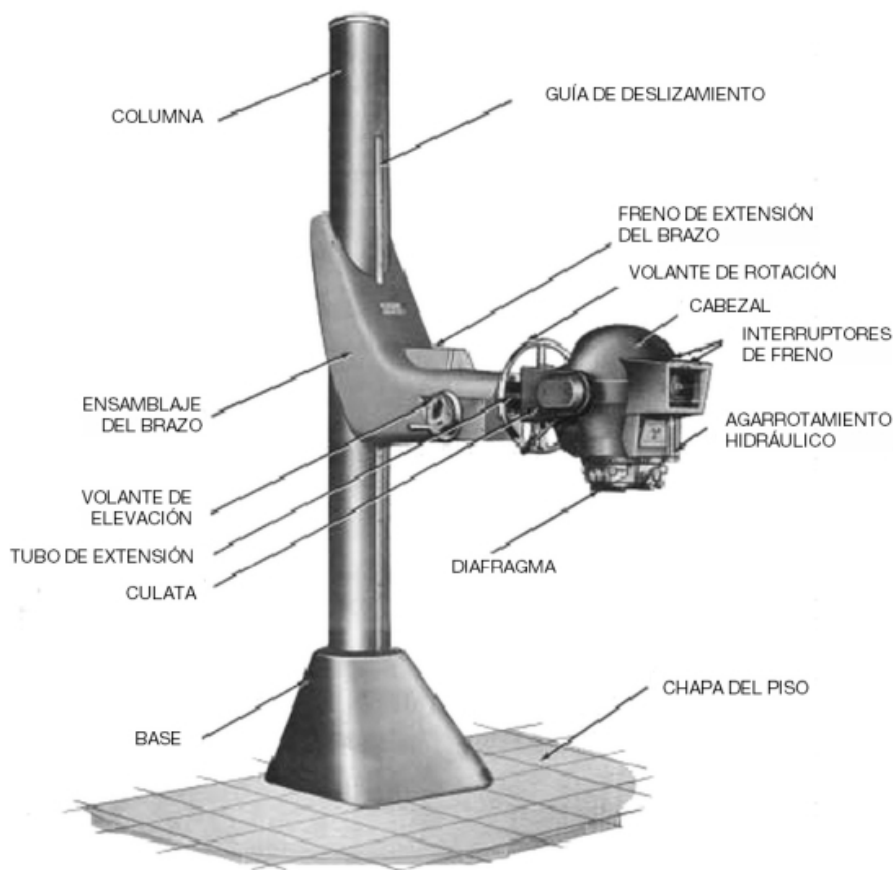


Fig. 14. Antigua unidad de teleterapia de cesio (alrededor de 1960).

Para facilitar el intercambio de fuentes de una máquina de teleterapia a otra y de una instalación de producción de radionucleidos a otra, se han elaborado cápsulas para fuentes estandarizadas para su utilización en todo el mundo. Las fuentes de teleterapia suelen ser sustituidas en el plazo de un período de semidesintegración de la instalación; sin embargo, distintas consideraciones financieras pueden dar lugar a un uso más prolongado de la fuente. Las máquinas de teleterapia están diseñadas para permitir la sustitución *in situ* de las fuentes por técnicos capacitados (las máquinas no se devuelven al fabricante para que las reemplace).

En la figura 15 se pueden observar fotografías de cabezales viejos y dañados que se retiraron de unidades de teleterapia.



Fig. 15. Cabezales de teleterapia viejos y dañados.

Las fuentes de cobalto 60 generalmente tienen una forma sólida y metálica, y están compuestas por varias pastillas o discos. Las fuentes tienen un encapsulamiento doble en acero inoxidable. Se fabrican en dos o tres tamaños normalizados, y pueden montarse en espaciadores de tungsteno dentro del cabezal de teleterapia. En la figura 16 se muestran varias fuentes de ^{60}Co utilizadas en distintas máquinas de teleterapia.



Fig. 16. Varias fuentes de teleterapia de ^{60}Co con sus correspondientes accesorios para cargar en los cabezales de teleterapia.

Las fuentes de teleterapia de cesio 137 suelen presentarse en forma de cloruro de cesio a fin de producir la elevada actividad específica necesaria para que las fuentes pequeñas puedan diseñarse con fines de tratamiento. Una vez que se rompe la contención de una fuente de cloruro de cesio, la gran movilidad del material provoca una rápida propagación de la contaminación. Por lo tanto, el problema es mayor en las fuentes con formas químicas que pueden dispersarse fácilmente.

4.1.4. Máquinas fijas de teleterapia de haces múltiples (Gamma Knife®)

El aparato de teleterapia de haces múltiples es un dispositivo similar, pero utiliza un gran número de fuentes del conjunto para centrarse en zonas de tratamiento bien definidas. Este dispositivo se utiliza para procedimientos médicos (radiocirugía) en casos de tumor cerebral y otras enfermedades del encéfalo.

Gamma Knife® (Elekta, Estocolmo, Suecia) es un dispositivo radioquirúrgico que está asociado a la radiocirugía desde hace 40 años. A pesar de los grandes avances tecnológicos de esta época, el diseño y los principios fundamentales de Gamma Knife® no han cambiado mucho desde que el neurocirujano sueco Lars Leksell presentó el prototipo de la unidad en 1968. La unidad incorpora 201 fuentes de ^{60}Co alojadas en el cuerpo central de la unidad. Estas fuentes producen 201 haces colimados que se dirigen a un solo punto focal (isocentro de la máquina) a una distancia entre la fuente y el foco de unos 40 cm. La definición final del tamaño del campo del haz circular la proporciona uno de los cuatro cascos que emiten campos circulares con diámetros nominales de entre 4 y 18 mm en el punto focal de la máquina (isocentro)

Hay aproximadamente 200 dispositivos de Gamma Knife® en todo el mundo, incluidos al menos 104 en los Estados Unidos. Elekta, empresa suizo-sueca, es el único fabricante del cuchillo gamma, mientras que MDS Nordion es el principal suministrador fuente de las pequeñas fuentes selladas de cobalto 60. Una empresa china, GammaStar, ha comenzado a comercializar un dispositivo que le hace competencia, y Elekta está vendiendo ahora una nueva versión de Gamma Knife® con 192 fuentes, en lugar de las 201 utilizadas en los modelos anteriores.

Las instalaciones en las que se encuentra un dispositivo de terapia están diseñadas específicamente para incluir paredes gruesas y blindadas, así como otros equipos de protección. En la figura 17 se muestra un ejemplo típico de máquina de teleterapia de haces múltiples.

Cada una de las fuentes de ^{60}Co de Gamma Knife[®] tiene la forma de una cápsula de acero de 1 mm de diámetro y 20 mm de altura, y contiene 20 pastillas de ^{60}Co . La cápsula se inserta en otra cápsula de acero, que está dentro de un casquillo y se carga en el cuerpo central de la máquina. El ensamblaje del casquillo de cada fuente se alinea con su precolimador (6,5 cm de aleación de tungsteno), colimador estacionario (9,25 cm de plomo) y el colimador final (6 cm de aleación de tungsteno) en uno de los cuatro cascos.



Fig. 17. Instalación de Gamma Knife[®] que muestra el cuerpo principal de la unidad que contiene 201 fuentes de cobalto (a $30\text{ Ci} = 1,11\text{ TBq}$ para cada fuente), la camilla de tratamiento, y un casco colimador unido a la camilla de tratamiento.

4.2. DISPOSITIVOS Y FUENTES DE LA CATEGORÍA 2

4.2.1. Proyectores de gammagrafía industrial

La radiografía de rayos gamma es una de las diversas tecnologías que se utilizan en la industria para la evaluación de la seguridad y el control de calidad. En particular, se utiliza ampliamente en las industrias química, petroquímica y de la construcción para la inspección radiográfica de tuberías, calderas y estructuras en las que las consecuencias económicas y de seguridad de una avería pueden ser graves.

Los proyectores de gammagrafía industrial se utilizan para la radiografía de estructuras de ingeniería. Contienen una fuente única unida a un cable flexible que puede ser expuesto cerca del objeto que se está investigando. Se coloca una película radiográfica detrás del objeto, y los rayos gamma penetrantes exponen la película. Las variaciones en la densidad del artículo que se radiografía se muestran en la imagen de la película. Los dispositivos se denominan también a menudo cámaras de radiografía (figura 18).

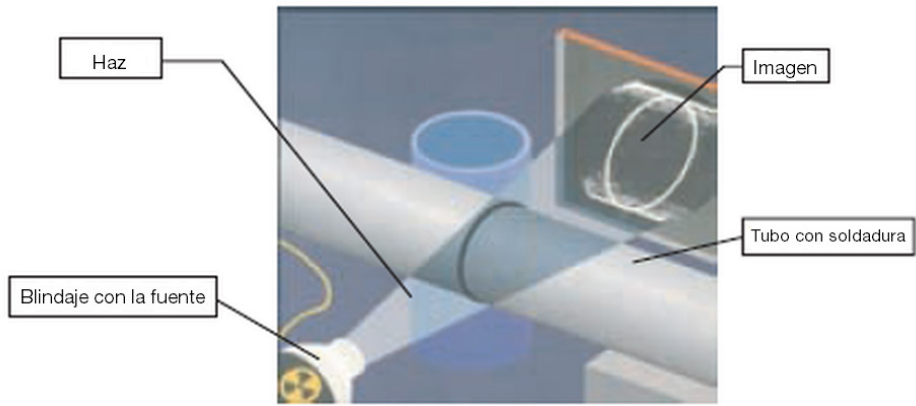


Fig. 18. Sistema de gammagrafía típico.

La mayor parte del equipo de radiografía industrial consiste en una unidad de radiografía, que puede contener uranio empobrecido como material de blindaje, y una o más fuentes selladas (figura 19). Actualmente, en la gammagrafía se utilizan fuentes que contienen ^{192}Ir o ^{60}Co , o ^{169}Yb , ^{170}Tm o ^{75}Se . Las fuentes suelen tener un doble encapsulamiento de acero inoxidable y contienen una o más pastillas de material activo en forma de metal. La fuente se mantiene en un ensamblaje flexible, a veces llamado portafuentes, lápiz o cola (véanse las figuras 20-22). Los dispositivos portátiles de radiografía industrial suelen ser de pequeño tamaño, aunque son relativamente pesados debido al blindaje.



Fig. 19. Proyectores de radiografía industrial típicos.



Fig. 20. Típicos ensamblajes antiguos de cola/fuente de gammagrafía.

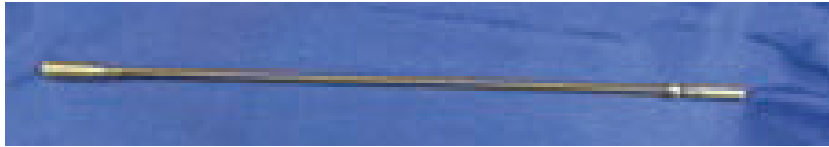


Fig. 21. Típico ensamblaje moderno de cola/fuente de gammagrafía.



Fig. 22. Cápsula interior de una fuente de gammagrafía típica antes de ser encapsulada en la cola.

Cuando no se utiliza, la fuente se encuentra en el centro del contenedor de la fuente. Durante el uso, la fuente es desplazada hacia abajo, a la posición deseada, por un dispositivo de control remoto. En las industrias pesadas, como las fundiciones de acero o las fábricas, el equipo radiográfico portátil, móvil (sobre ruedas) o fijo, que contiene ^{192}Ir , ^{60}Co o ^{137}Cs , puede instalarse en recintos construidos a tal efecto. Debido a que las instalaciones móviles o fijas incorporan un blindaje más pesado que las cubiertas protectoras de las fuentes portátiles, son menos susceptibles de robo y más difíciles de desmontar.

Las cubiertas protectoras de las fuentes portátiles contienen varias decenas de kilogramos de material de blindaje, como uranio empobrecido, plomo o tungsteno, que pueden considerarse potencialmente valiosos. También cabe destacar que la portabilidad de la mayoría de los equipos permite utilizarlos casi en cualquier lugar. A menudo se emplean en lugares remotos o en condiciones de trabajo extremas. Esta situación, unida a una supervisión limitada o inexistente, ofrece la posibilidad de que se pierdan o se roben contenedores enteros con sus fuentes. Pueden terminar en la industria del reciclado de metales o permanecer en el dominio público. Se trata de problemas similares a los de las fuentes de teleterapia en desuso y, aunque los niveles de actividad de la radiografía industrial son menores, siguen siendo suficientes para producir efectos letales. Tal vez la amenaza más significativa proviene de la pérdida de una fuente radiactiva sin blindaje. Sus ingentes cantidades, el entorno de trabajo, el nivel de actividad y la portabilidad o movilidad de la mayoría de las fuentes de radiografía industrial las convierten en objetivos principales de la adquisición intencionada con fines dolosos.

4.2.2. Máquinas de braquiterapia de alta/media tasa de dosis

La braquiterapia (terapia a corta distancia) es un término que se utiliza para describir la aplicación intersticial, o intracavitaria, de fuentes radiactivas colocándolas directamente en el tumor (mama, próstata), en un molde (piel, recto) o en aplicadores especiales (vagina, cuello uterino). Las aplicaciones de la braquiterapia son de dos variedades ligeramente diferentes. Generalmente se denominan braquiterapia de alta tasa de dosis (categoría 2) y braquiterapia de baja tasa de dosis (categoría 4 o 5). Las fuentes de alta tasa de dosis, y algunas fuentes de baja

tasa de dosis, pueden tener la forma de un cable largo conectado a un dispositivo (un dispositivo remoto de carga diferida).

Los dispositivos de carga diferida pueden ser pesados debido al blindaje de las fuentes cuando no están en uso. El dispositivo puede montarse sobre ruedas para su transporte dentro de una instalación. El dispositivo de carga diferida a distancia también puede contener componentes eléctricos y electrónicos para su funcionamiento (figura 23). Cuando se utilizan estos dispositivos, primero se introducen catéteres en el cuerpo y luego se introducen las fuentes, unidas a cables, por control remoto.

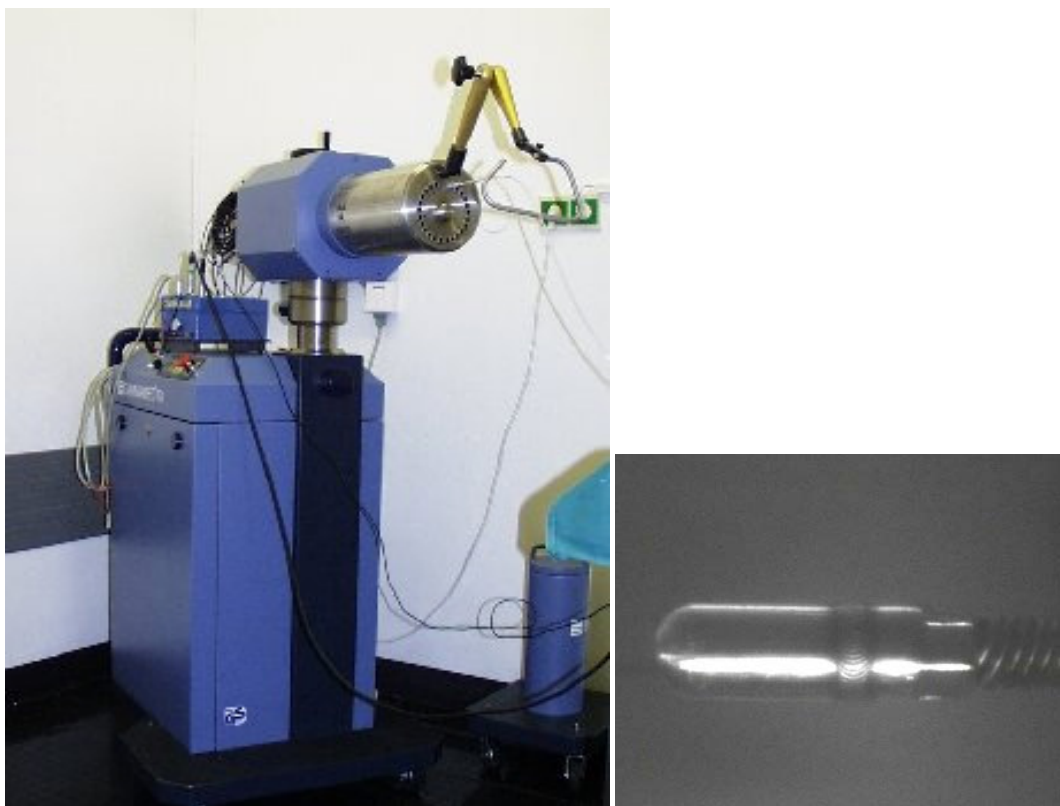


Fig. 23. Máquina de braquiterapia de baja tasa de dosis con fuentes de ^{192}Ir y una fuente de ^{192}Ir .

Históricamente se utilizaba el ^{226}Ra para la braquiterapia. Las fuentes se encapsulaban en platino en agujas o tubos de unos pocos milímetros de ancho y hasta 5 cm de largo. Actualmente, la mayoría de las braquiterapias de alta y media tasa de dosis se realizan con ^{192}Ir , pero también se utilizan ^{60}Co y ^{137}Cs . Las fuentes se fabrican en diferentes tamaños y formas, incluidos alambres o cintas.

Cuando no se utilizan, las fuentes de braquiterapia se almacenan normalmente en cajas fuertes o contenedores blindados de plomo, pero ha habido casos en que las fuentes se han mantenido indebidamente cargadas en aplicadores en vehículos de transporte. Del mismo modo, las fuentes que han superado su vida útil se han dejado en cajas fuertes o contenedores de transporte. Si el cable de un cargador en diferido remoto se rompe, las fuentes pueden desprenderse. El hecho de no reconocer estos problemas puede plantear riesgos importantes.

4.2.3. Sistemas de calibración

Los sistemas de calibración utilizan fuentes radiactivas de actividad alta (aproximadamente 15 a 82 TBq (400 a 2200 Ci)) para producir campos de radiación de intensidad conocida para la calibración de equipo de vigilancia de las radiaciones y dosímetros, con lo que el equipo y los dosímetros pueden ser evaluados para su funcionamiento preciso. Se necesita una fuente de actividad medida para calibrar los instrumentos y los dosímetros según las normas aceptadas. En la figura 24 se muestra un diagrama y una fotografía de una fuente de calibración de rayos gamma típica.

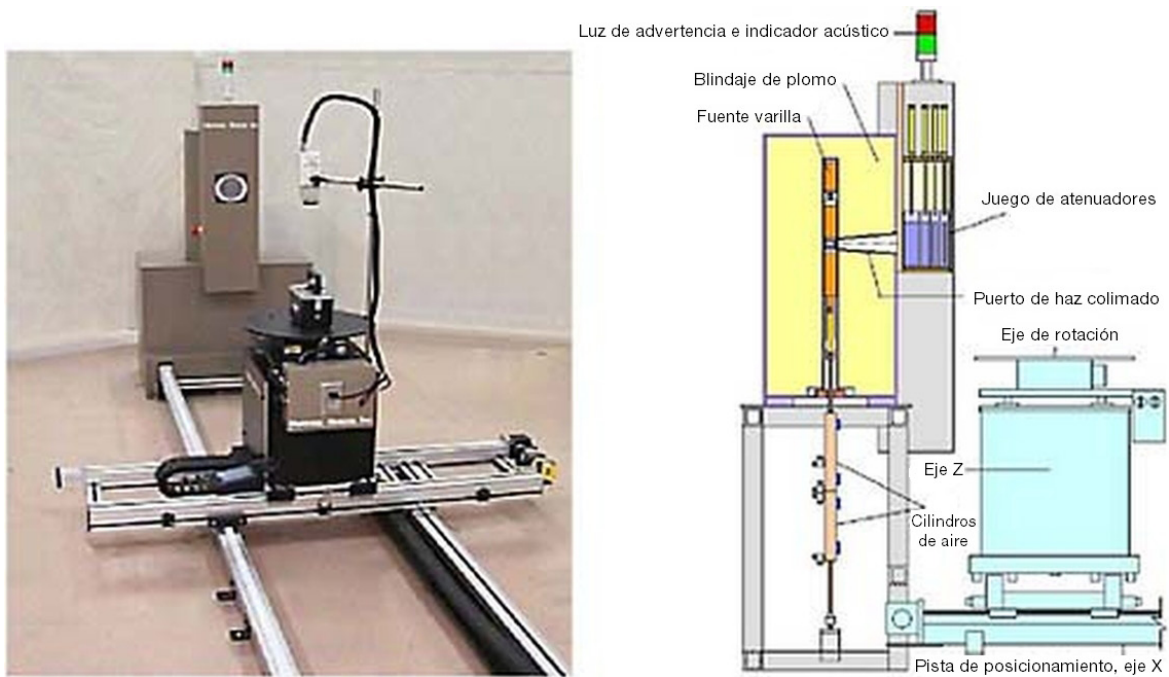


Fig. 24. Configuración habitual de un calibrador gamma para instrumentos de medición.

El sistema suele consistir en fuentes radiactivas, blindaje contra la radiación, un mecanismo para posicionar la fuente y una pista o cámara interna para posicionar los elementos a calibrar. Los sistemas de calibración modernos pueden contener un controlador informático y sistemas de seguridad, como la monitorización por video, monitores de radiación, luces e indicadores de advertencia y un sistema de enclavamiento de seguridad.

Hay un gran número de fuentes radiactivas que se utilizan para la calibración de instrumentos y otros fines. Debido a que se utiliza una amplia gama de radionucleidos y actividades, estas fuentes no pueden asignarse a ninguna categoría en particular; sin embargo, las fuentes de calibración de ^{60}Co y ^{137}Cs de mayor tamaño generalmente pertenecen a la categoría 2. Algunas fuentes podrían pertenecer a las categorías 3 y 4, pero la mayoría de ellas quedan comprendidas en la categoría 5.

Algunas fuentes de calibración, especialmente las de mayor actividad, se encuentran en dispositivos específicamente diseñados, blindados y colimados dentro de grandes instalaciones blindadas. Otras son simplemente fuentes individuales que podrían utilizarse para distintos propósitos, como en la industria nuclear, la protección del medio ambiente y las instituciones de investigación y enseñanza. En las fuentes de calibración se utiliza una amplia gama de radionucleidos, o una combinación de ellos, y se dispone de una variedad de diseños y formas de fuentes (figura 25).



Fig. 25. Ejemplos de fuentes de calibración de actividad baja de ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{90}Sr y ^{226}Ra .

4.3. DISPOSITIVOS Y FUENTES DE LA CATEGORÍA 3

4.3.1. Calibradores industriales fijos

Los calibradores radiactivos fijos se utilizan para medir el nivel, el espesor, la densidad, el contenido de humedad o la presencia de un material específico mientras se extrae, fabrica o procesa sin entrar en contacto con el propio material (figura 26). En función de la aplicación específica, los calibradores industriales pueden contener cantidades relativamente pequeñas de material radiactivo, o pueden contener fuentes con actividades de cerca de 1 TBq. Las fuentes de ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{252}Cf de mayor actividad (en torno a 100 GBq), que se utilizan como calibradores de nivel, de transportadores, de draga, de altos hornos o calibradores giratorios de espesor, son fuentes de la categoría 3, mientras que la mayoría de los demás calibradores de espesor, humedad/densidad y nivel de carga quedan comprendidos en la categoría 4.

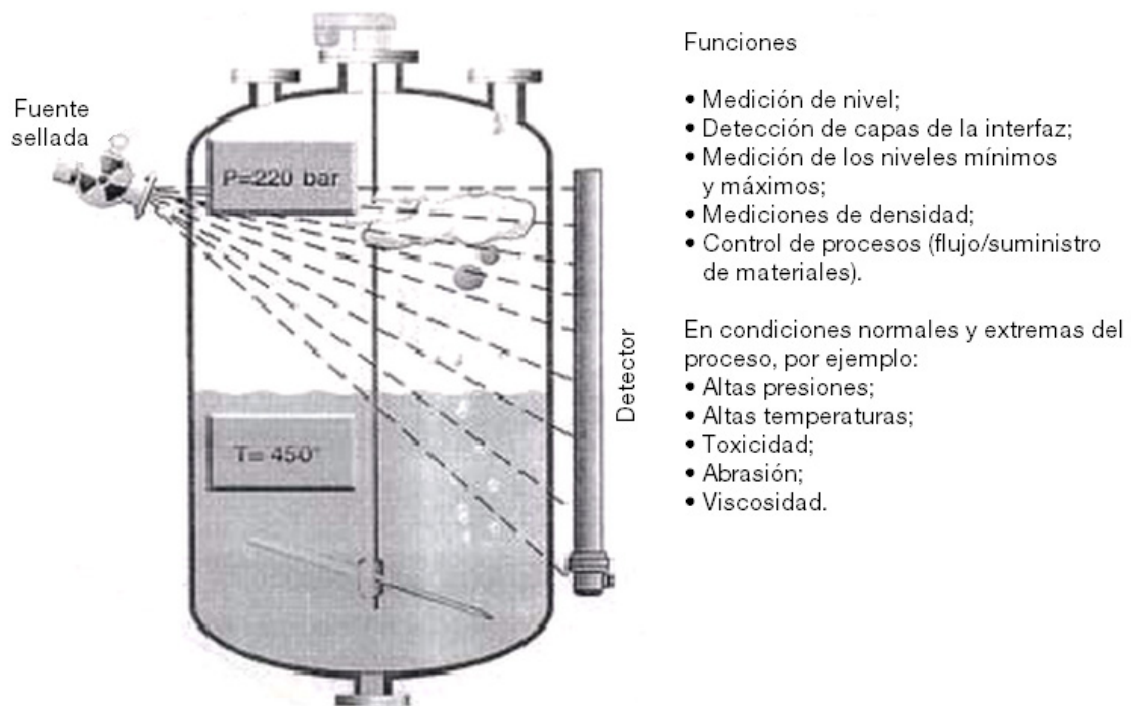


Fig. 26. Diversas funciones de las fuentes selladas en el control de procesos.

En los altos hornos, empleados para la fabricación de acero, a menudo se utilizan fuentes de ^{60}Co para medir el desgaste del revestimiento refractario del fondo de la chimenea. Los calibradores giratorios de espesores utilizan fuentes de ^{137}Cs para medir el espesor de la pared de las tuberías cuando pasan por el centro del calibrador. Si bien estos calibradores se incluyen en la categoría de calibradores fijos, también pueden instalarse en camiones. Sin embargo, pueden ser bastante pesados (en torno a 100 kg) debido a que están blindados con plomo o tungsteno (figura 27).



Fig. 27. Ejemplos de diferentes tipos de calibradores.

Por lo general, los dispositivos no son grandes, pero es posible que se encuentren a cierta distancia del detector de radiación, el cual puede tener componentes eléctricos o electrónicos asociados dentro de su caja. Puede que se desconozca la ubicación de esos dispositivos o fuentes en una instalación, puesto que los dispositivos suelen estar conectados al equipo de control de procesos. Ese desconocimiento puede dar lugar a una pérdida de control si la instalación decide reacondicionar alguna planta o poner fin a las operaciones.

La fuente en desuso puede terminar en la industria del reciclaje de metales. Si no se monitoriza la ruta de reciclaje de los metales, o el sistema no funciona, la fuente podría fundirse, lo que daría lugar a la contaminación de la fundición y a la incorporación del material radiactivo a los artículos fabricados.

4.3.2. Fuentes de diagrafía de pozos

La diagrafía de pozos es la práctica que consiste en medir las propiedades de los estratos geológicos a través de los que se ha perforado o se está perforando un pozo. Un diagrama de pozo es el trazado o el registro de los datos de un sensor de fondo delineados en relación con la profundidad del pozo. Se utiliza de forma más habitual en las industrias petrolera y gasística que buscan zonas de hidrocarburos recuperables. En el caso de la producción de petróleo y gas, las empresas desearían disponer de varios tipos de información sobre una capa geológica, como el contenido de hidrocarburos. A fin de medir esas propiedades, se puede hacer descender fuentes y sensores cargados en sondas por un pozo barrenado existente (una técnica llamada "sondeo diagráfico"), o también se pueden montar en un collar detrás del cabezal de perforación para tomar medidas durante la perforación del pozo.

Para determinar la densidad, la porosidad y la humedad de las estructuras geológicas, o el contenido de hidrocarburos, se utiliza una combinación de fuentes gamma y de neutrones. Las fuentes de neutrones que se utilizan de forma más habitual son de $^{241}\text{Am-Be}$ de hasta 800 GBq, pero también se han utilizado fuentes de $^{239}\text{Pu-Be}$ y de $^{226}\text{Ra-Be}$. Las fuentes gamma más utilizadas son las fuentes de ^{137}Cs de 50 a 100 GBq. Las fuentes más pequeñas, que a menudo contienen radio, se siguen utilizando para fines de referencia. Las fuentes suelen estar dentro de dispositivos largos (generalmente, de 1 a 2 m) pero finos (<10 cm de diámetro), que también contienen detectores junto con varios componentes electrónicos. Los dispositivos son pesados, debido a la robustez necesaria para los entornos en los que se utilizan. La figura 28 es una ilustración esquemática de una fuente de neutrones y un equipo de diagrafía de sondeos. En las figuras 29 y 30 aparecen un ejemplo de equipo de diagrafía de sondeo y algunas fuentes típicas de neutrones de $^{241}\text{Am-Be}$ para diagrafía de pozos petrolíferos.

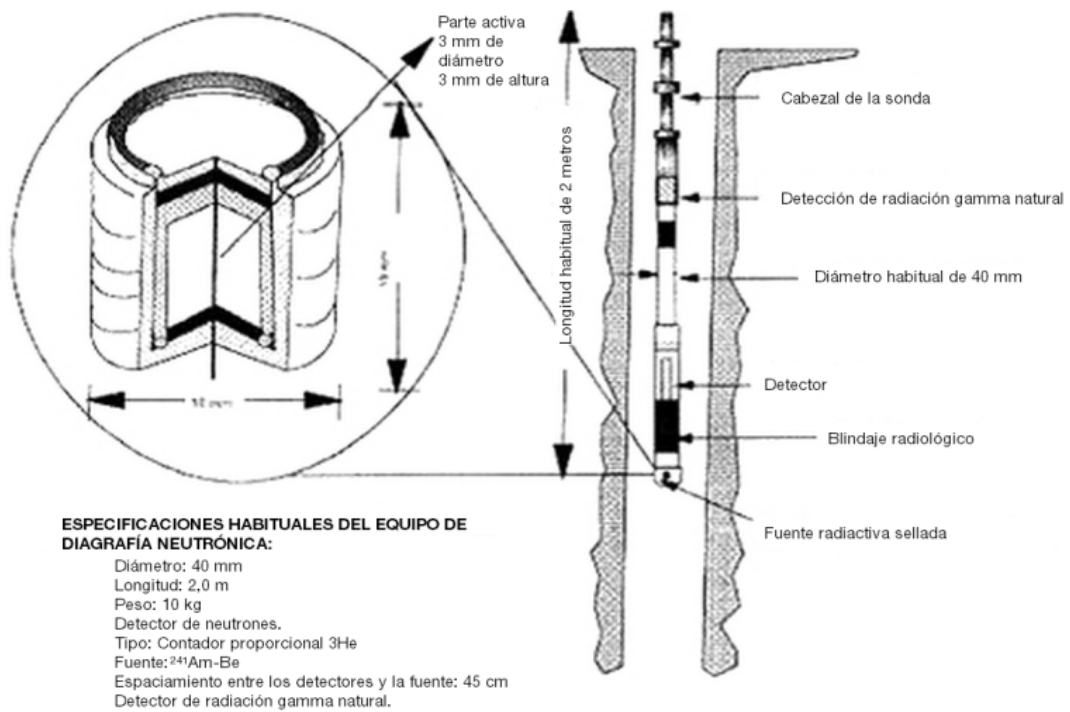


Fig. 28. Ilustración esquemática de una fuente de neutrones y un equipo de diagrafía de pozos.



Fig. 29. Cabezal de fuente de equipo de gammagrafía "crawler" en contenedor de transporte.



Fig. 30. Fuentes de neutrones de $^{241}\text{Am-Be}$ para diagrafía de pozos petrolíferos.

La figura 31 es una fotografía de un instrumento de densidad gamma-gamma, en la que se aprecia el dispositivo de manejo de la fuente para insertar y extraer la fuente de ^{137}Cs .



Fig. 31. Atlas Densilog, que utiliza una fuente vitrificada de ^{137}Cs para mediciones de densidad con cable guía. La varilla que se extiende hacia abajo es un dispositivo de manejo de la fuente. Los círculos de color claro son ventanas para la fuente y los detectores.

Las cajas en las que se almacenan y transportan las fuentes de neutrones para diagrafía son grandes y pueden ser atractivas para los ladrones. La mayor parte del blindaje será normalmente de plástico o parafina y puede ser desechado por los ladrones al considerar que no tiene valor, lo que da lugar a una situación potencialmente peligrosa. Las cajas de las fuentes gamma normalmente estarán protegidas con uranio empobrecido o plomo, lo que podría ser atractivo por su valor como chatarra. La índole del trabajo para el que se utilizan estas fuentes exige que se puedan retirar con facilidad de sus cajas para ser introducidas en un sondeo. Si no estuvieran sujetas a un control adecuado, sería relativamente sencillo retirar la fuente y dejarla en un estado que entrañe peligro.

4.3.3. Marcapasos

Durante las décadas de 1970 y 1980, se implantaron marcapasos (figura 6) que utilizaban material radiactivo como fuente de energía (a saber, generadores termoeléctricos de radioisótopos muy pequeños) en varios pacientes. El radionucleido que se utilizó de manera más habitual fue el ^{238}Pu (con una pequeña cantidad de ^{241}Am como contaminante de la fuente). Una ventaja del uso del ^{238}Pu es que es relativamente fácil de proteger, lo que da lugar a una dosis externa mínima.

Es posible que las fuentes se desechen después de la autopsia y terminen en metales reciclados. El hecho de que las fuentes de ^{238}Pu se blinden con facilidad también comporta que no sean fáciles de encontrar.

4.4. DISPOSITIVOS Y FUENTES DE LA CATEGORÍA 4

4.4.1. Fuentes para braquiterapia de baja tasa de dosis

Gran parte del análisis general relativo a la braquiterapia en relación con las fuentes de la categoría 2 también es aplicable en este caso, salvo que las actividades son menores y que también se utilizan otros radionucleidos, como el ^{125}I y el ^{198}Au .

4.4.2. Calibradores de espesor/nivel de carga

Las fuentes beta (figura 32) o gamma de baja energía se utilizan para medir el espesor del papel, los plásticos y los metales finos y ligeros, mientras que las fuentes gamma de mayor energía se utilizan en la fabricación de planchas de acero (en la figura 33 hay un ejemplo). Ciertas industrias, como las fábricas de cerveza o las plantas embotelladoras de refrescos, utilizan fuentes de actividad baja en el control de calidad para asegurarse de que las botellas o latas se llenan correctamente. Los fabricantes de cigarrillos también utilizan fuentes para asegurarse de que se mantiene la densidad de empaquetamiento adecuada.

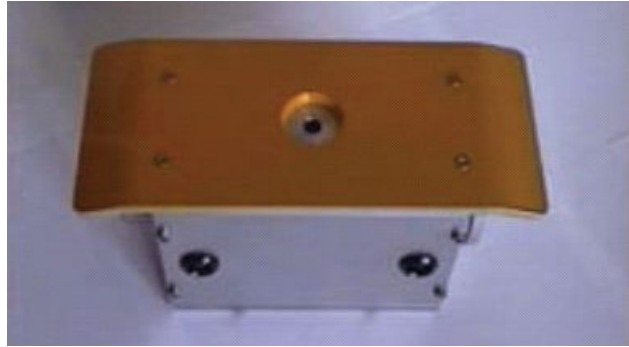


Fig. 32. Detalle de un soporte de fuente de medición beta.

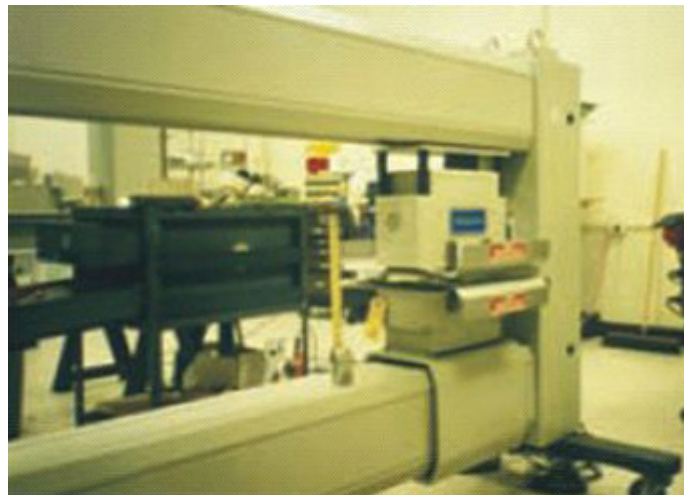


Fig. 33. Sonda beta instalada en un laminador de bobina.

Entre los radionucleidos que se utilizan normalmente en estas industrias cabe citar los siguientes: ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{147}Pm , ^{244}Cm y ^{137}Cs . Las actividades van desde 0,4 GBq hasta cerca de 20 GBq. La fuente radiactiva se elige en función del espesor del material que se va a medir, para optimizar las características de atenuación de la radiación. El estroncio 90 se emplea para aplicaciones más espesas y densas, y se puede llegar a utilizar hasta el ^{147}Pm para los materiales más delgados y de menor densidad. En la figura 34 hay varios ejemplos de fuentes de Cs extraídas de los calibradores.



Fig. 34. Ejemplos de fuentes de Cs extraídas de los calibradores.

4.4.3. Densímetros y medidores de humedad portátiles

Estos dispositivos utilizan dos tipos de fuentes de radiación juntas: una fuente gamma de energía alta de ^{137}Cs de aproximadamente 40 MBq (1 mCi) y una fuente de neutrones de $^{241}\text{Am/Be}$ de aproximadamente 2 GBq (55 mCi). Los dispositivos son portátiles y se utilizan normalmente para medir la densidad y el contenido de humedad del suelo y los materiales de construcción. La densidad se determina midiendo la cantidad de radiación retrodispersada de la fuente gamma, y el contenido de humedad se deduce a base de la medición gamma y de una medición de la cantidad de radiación neutrónica retrodispersada.

Las fuentes son de tamaño pequeño, normalmente de unos pocos milímetros de largo y unos pocos centímetros de diámetro, y se encuentran dentro del dispositivo o en el extremo de un ensamblaje de varilla/manivela. Los dispositivos portafuente suelen consistir en una caja de acero pesada, con la fuente cargada en el centro, y blindaje neutrónico, que puede ser polietileno u otro tipo de material con alto contenido de hidrógeno. El dispositivo es del tipo sencillo de ventana, que se abre para revelar una apertura a través de la cual se transmite un haz de radiación. En la mayoría de los casos, el detector de neutrones se encuentra dentro del mismo dispositivo que la fuente.

Los medidores de humedad se utilizan en la agricultura para asegurar un riego óptimo (figura 35), mientras que en la construcción de carreteras se suelen utilizar junto con densímetros, o solo estos últimos, para asegurar la compactación adecuada de los materiales de cimentación (figura 36).



Fig. 35. Medidor de humedad de material a granel.



Fig. 36. Medidor portátil de $^{241}\text{Am}/\text{Be}^{137}\text{Cs}$.

Los medidores portátiles se utilizan en lugares remotos en los que se están construyendo carreteras. Esa característica, y su pequeño tamaño, hace que sean susceptibles de robo o de que su control se pierda. A veces sufren daños causados por otros equipos de construcción de carreteras que pueden pasarse por alto.

4.4.4. Densitómetros óseos

Como su nombre indica, las fuentes de densitómetros óseos se utilizaron en dispositivos diseñados para medir la densidad ósea como parte de una evaluación de la osteoporosis. Los radionucleidos que se utilizaban en estas fuentes son principalmente ^{109}Cd , ^{153}Gd , ^{125}I and ^{241}Am , con un rango de alrededor de 1 a 50 GBq.

4.4.5. Eliminadores de electricidad estática

En muchas industrias, la generación de electricidad estática durante la fabricación crea problemas, lo que da lugar a la sedimentación de partículas de polvo en los componentes, circunstancia que puede ser un peligro potencial de incendio. Para minimizar esos problemas, se utilizan eliminadores estáticos que incorporan fuentes de ^{241}Am , ^{210}Po y ^{90}Sr .

Hay dos tipos principales de dispositivos: barras (figura 37) y pistolas (figura 38). Los dispositivos de barra emiten una “nube” de partículas alfa a una distancia de cerca de 8 centímetros de la superficie que ionizan el gas circundante (aire) y permiten que las cargas estáticas en los materiales circundantes pasen a tierra con seguridad mediante una lenta descarga. Los dispositivos de pistola se emplean en líneas neumáticas de aire, y el aire que circula por ellas se ioniza. La corriente de aire resultante puede utilizarse para soplar el polvo de los objetos y eliminar la carga estática sobre ellos que atrae el polvo. En el caso de las barras, la laminilla de metal se encuentra dentro de una funda de metal con una rejilla que permite el libre movimiento del aire ionizado, y al mismo tiempo protege la laminilla; y en lo que respecta a las pistolas, la laminilla se encuentra dentro de una funda tubular de metal que forma parte del tubo de aire y la empuñadura de la pistola.

El tamaño de los dispositivos varía desde los dispositivos manuales, de unos pocos centímetros de longitud, hasta las instalaciones fijas de varios metros de largo y unos pocos centímetros de ancho (figura 37). La configuración geométrica de algunos de estos dispositivos es bastante complicada en el sentido de que el material de la fuente radiactiva está distribuido por la superficie de la estructura. Dado que los eliminadores estáticos utilizan las partículas alfa emitidas, el conjunto de la fuente es frágil y no puede soportar el maltrato físico o el fuego, cualquiera de los cuales puede resultar en la propagación de la contaminación.



Fig. 37. Barras eliminadoras de electricidad estática.



Fig. 38. Pistola de aire típica de eliminador de electricidad estática.

4.5. DISPOSITIVOS Y FUENTES DE LA CATEGORÍA 5

Hay un gran número y variedad de fuentes de la categoría 5 que se utilizan en: fluorescencia de rayos X, dispositivos de captura de electrones, espectrometría Mössbauer, blancos de tritio de tomografía por emisión de positrones y detectores de humo (figuras 39 y 40). Además, el tratamiento superficial de las lesiones cutáneas y oftálmicas se lleva a cabo utilizando fuentes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Los aplicadores nasofaríngeos (^{90}Sr) han sustituido a la sonda de radio “Crowe” que se utilizaba en la década de 1970. También se desarrollaron implantes permanentes en esa época, utilizando semillas radiactivas de ^{198}Au . Hoy en día los implantes permanentes utilizan ^{125}I , $^{106}\text{Ru/Rh}$ y ^{103}Pd .

Las fuentes de la categoría 5 presentan un peligro tan bajo que, por lo general, no es necesario considerarlas en una estrategia nacional. La pérdida de control de esas fuentes es más una cuestión reglamentaria y administrativa que un problema de seguridad radiológica o de las fuentes radiactivas.

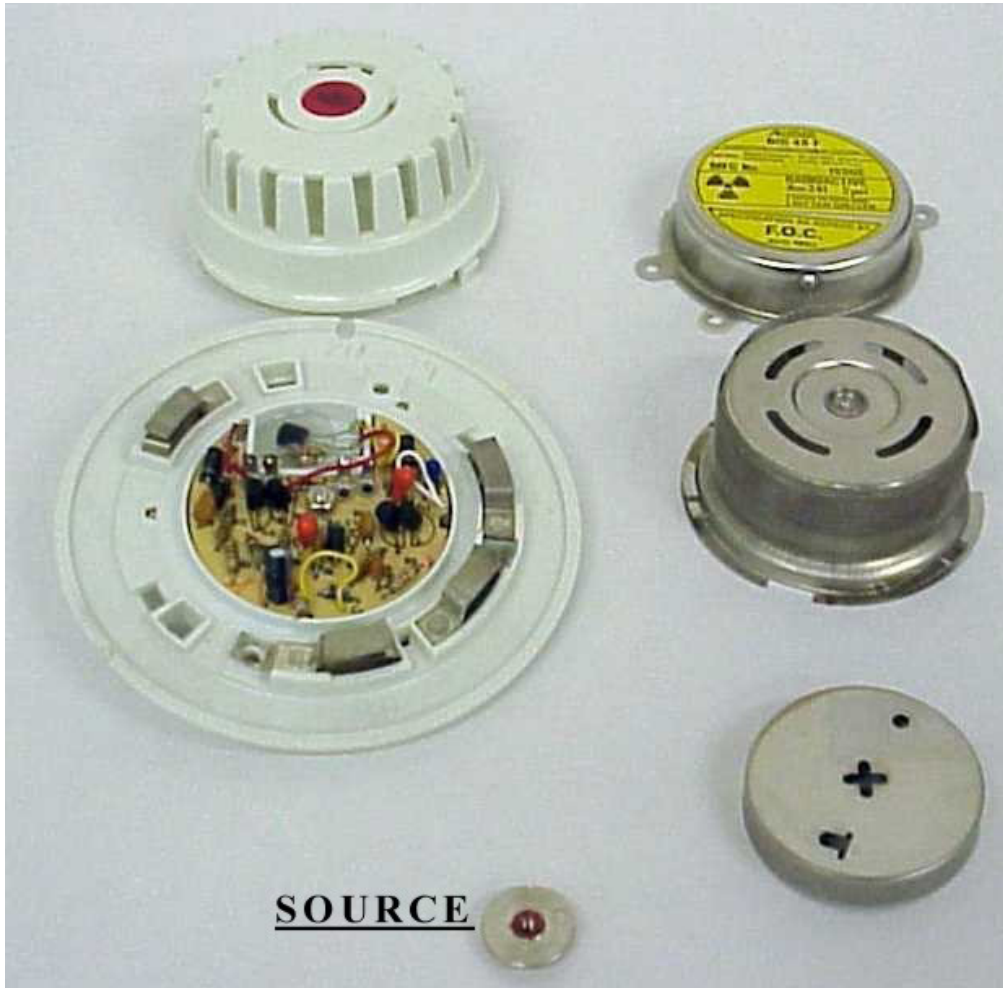


Fig. 39. Detector de humo desmontado.

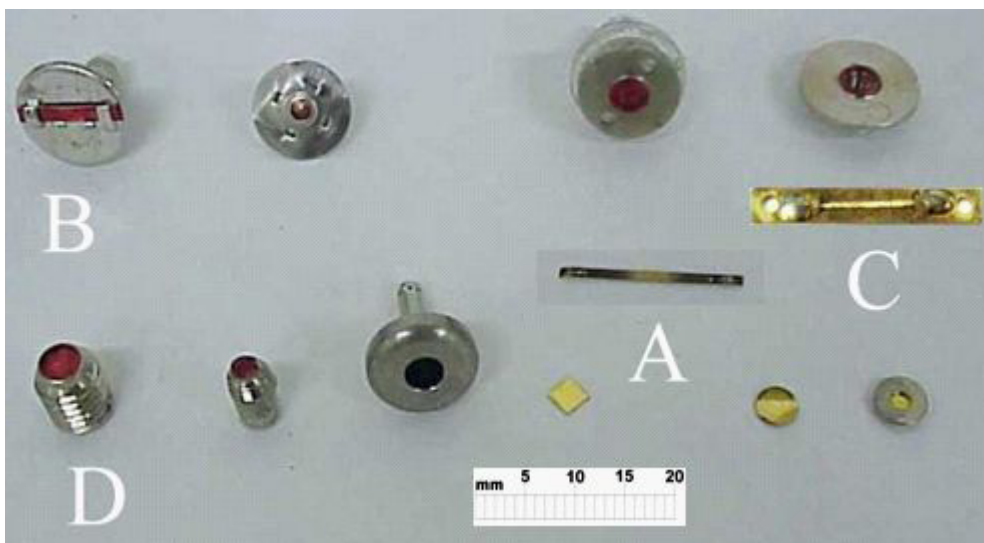


Fig. 40. Típicas fuentes radiactivas de ^{241}Am que se utilizan en los detectores de humo.

4.6. SITUACIONES ESPECÍFICAS

Desde el punto de vista de la gestión, un problema particular lo representan las fuentes antiguas que se utilizaban antes del establecimiento de los requisitos reglamentarios apropiados y que todavía están almacenadas. El tipo de fuentes antiguas depende de cuándo entraron en vigor los controles reglamentarios en un Estado Miembro. Es probable que la mayoría de las fuentes antiguas sean de radio, pero no solo de ese elemento.

4.6.1. Pararrayos

En muchos países se instalaron pararrayos radiactivos (figura 41). El radionucleido de las fuentes, como el ^{60}Co , el ^{85}Kr , el ^{152}Eu , el ^{226}Ra o el ^{241}Am , aumenta la eficacia del dispositivo mediante la ionización del aire circundante. Donde se usó ^{60}Co , ^{85}Kr o ^{152}Eu , el contenido radiactivo se encapsuló y blindó para dirigir el haz de radiación hacia arriba. No hay riesgo de contaminación, pero la tasa de dosis en la parte superior de la varilla puede alcanzar varios miles de mSv/h. El radio 226 o ^{241}Am no está encapsulado, sino que se deposita en láminas o se mezcla con cerámica. La tasa de dosis es inferior a 1 mSv/h, pero la contaminación está presente de forma constante. Por estas razones, y porque la eficacia del dispositivo no era suficiente, se han dejado de utilizar los pararrayos radiactivos. Sin embargo, desde 1986, la fabricación y la venta de pararrayos radiactivos están prohibidas en todos los países de la Unión Europea.



Fig. 41. Pararrayos de ^{241}Am .

4.6.2. Usos en la investigación y la enseñanza

Debido a la amplia gama de aplicaciones de las fuentes radiactivas en la enseñanza y la investigación, en esta sección se analizan brevemente las fuentes que se utilizan. Prácticamente todos los radionucleidos de todas las actividades pueden tener alguna aplicación en el ámbito de la investigación y, por lo tanto, esas fuentes pueden entrar en cualquier categoría.

Los irradiadores de investigación se utilizan para exponer materiales biológicos y no biológicos a radiaciones de diversos tipos a fin de evaluar la respuesta de los materiales blanco a diversas dosis, tasas de dosis y energías de la fuente de radiación aplicada. Esas unidades se utilizan de manera limitada en la investigación de materiales y ampliamente en la investigación radiobiológica. Se emplean para evaluar los componentes electrónicos y también los componentes de los satélites.

La investigación radiobiológica consiste en la exposición de células bacterianas, de levadura o de mamíferos a dosis graduadas de radiación con miras a analizar la respuesta o la exposición de animales enteros o porciones de animales vivos para evaluar la respuesta frente a la dosis. La exposición biológica también puede servir para realizar otros estudios, por ejemplo, para causar inmunodepresión a fin de poder evaluar un trasplante. La irradiación de investigación se ha realizado con dos tipos principales de irradiadores: unidades de haces situadas en una sala blindada e irradiadores autónomos con blindaje incorporado. Las unidades de haces son similares a las bombas de cesio o cobalto para radioterapia, pero están en una sala blindada de un laboratorio de investigación. Emitirán tasas de dosis de 1 a 3 Gy/min a 50-80 cm de distancia. Las unidades autónomas se colocan en salas específicas de los laboratorios (véase la figura 42).



Fig. 42. Irradiadores de investigación de diferentes fabricantes.

Ahora bien, las fuentes más utilizadas en la investigación son las de actividad baja o las que tienen un período de semidesintegración corto. Se utilizan frecuentemente fuentes de tritio (^3H) y de ^{14}C ; tienen emisiones beta débiles, lo que genera un peligro radiológico potencialmente menos grave, sobre todo cuando están en desuso. Muchas de esas fuentes se utilizan para la captura de electrones, en el cromatógrafo de gases y en los dispositivos de espectrometría Mössbauer. Las excepciones notables son el uso de fuentes de ^{60}Co y ^{137}Cs grandes (de hasta 1 PBq) para la irradiación o la esterilización. Aunque algunas instalaciones de irradiación pueden ser de escala similar a la industrial, la mayoría son de tipo fijo y autoblandadas y están diseñadas para aceptar muestras en la cámara de irradiación.

El trabajo de investigación se lleva a cabo a menudo como parte de la tesis de un estudiante o en el marco de un contrato financiado de forma específica. El equipo, incluidas las fuentes radiactivas, se puede haber obtenido concretamente para un proyecto determinado. Cuando el trabajo se termina o se agotan los fondos, es posible que no haya un uso inmediato o ulterior de las fuentes, y cabe la posibilidad de que la persona responsable se marche. En muchos casos las fuentes se almacenan, pero tal vez no esté claro quién es el “propietario” dentro de la organización que asume la responsabilidad de la fuente. Por consiguiente, el principal problema de las fuentes para la investigación o la enseñanza surge cuando el equipo se deja de utilizar y el personal experto abandona la organización.

4.6.3. Usos militares

En la mayoría de los países, los usos militares de las fuentes radiactivas quedan fuera del control reglamentario civil convencional. Por esa y otras razones, los usos militares de las fuentes radiactivas exigen una consideración aparte. Las fuentes que se utilizan en las aplicaciones militares pueden abarcar una amplia gama de categorías. Si bien muchos de los usos son similares a los que se encuentran en la medicina, la industria y el mundo académico, hay algunas aplicaciones que son exclusivas de las fuerzas armadas, o que utilizan actividades significativamente mayores que las de los dispositivos civiles no militares comparables. Entre los ejemplos de aplicaciones militares cabe citar:

- los generadores termoeléctricos de radioisótopos;
- las fuentes para el entrenamiento con simulación de un ataque con armas nucleares;
- el material técnico (aleaciones de torio) y las lámparas de gas;
- los detectores de gas;
- el tritio y el ^{226}Ra en dispositivos luminosos (actividades mucho mayores que en los usos civiles).

Es probable que las fuerzas armadas, por razones de seguridad, tengan un inventario separado del inventario nacional normal. Por lo tanto, será necesario consultar directamente a las autoridades militares para evaluar la situación.

4.7. MASA Y DIMENSIONES DE LOS DISPOSITIVOS HABITUALES

En el cuadro 5 se resumen la masa y el tamaño de distintos dispositivos habituales con fuentes radiactivas selladas.

CUADRO 5. MASA Y DIMENSIONES DE VARIOS DISPOSITIVOS HABITUALES

Dispositivo	Categoría	Masa habitual	Dimensiones habituales	Observaciones
Planta industrial de esterilización	1	n.a.	Edificio de 100 m × 200 m × 50 m	
Máquina de teleterapia	1	500-1000 kg	4 m de largo × 2 m de ancho × 3 m de alto	
Irradiador de sangre	1	1500-3500 kg	1 m de largo × 1 m de ancho × 1,5 m de alto	
Máquina de teleterapia de haces múltiples (cuchillo gamma)	1	20 000 kg	4-5 m de largo × 2 m de ancho × 2,5 m de alto	Dispositivo blindado
Irradiador de muestras a pequeña escala	1	1000-6000 kg	1,5 m de largo × 1,5 m de ancho × 2 m de alto	
Irradiador de semillas	1	Cámara (desmontada) 3000-6000 kg	1,5 m de largo × 1,5 m de ancho × 2 m de alto	Puede montarse en vehículos
Generadores termoeléctricos de radioisótopos	1	500-1000 kg	1,5 m de largo × 1,5 m de ancho × 1,5 m de alto	Excluidos los marcapasos
Tapón ciego de sonda gamma para diagrafía de pozos	2	500-1000 g	20-60 mm de diámetro × 100-150 mm de largo	
Tapón ciego de sonda de neutrones para diagrafía de pozos	2	400-1000 g	20-60 mm de diámetro × 100-200 mm de largo	
Proyector de gammagrafía	2	8-35 kg	350 mm de largo × 200 mm de ancho × 240 mm de alto	Se utiliza para fuentes de Ir-192, Se-75
Cambiador de fuentes de gammagrafía	2	40 kg	250 mm de largo × 210 mm de ancho × 340 mm de alto	Cambiador de fuentes
Proyector de gammagrafía (Co-60)	2	100-200 kg	900 mm de largo × 900 mm de ancho × 900 mm de alto	Dispositivo semiportable de ⁶⁰ Co
Equipo de gammagrafía "crawler" para inspección de soldaduras en tuberías	2	50-100 kg	800-1500 mm de largo × 400 mm de ancho × 400 mm de alto	
Sonda gamma de alta energía de densidad, espesor y nivel	3	20-400 kg	200-400 mm de diámetro × 300-700 mm de largo	
Sonda gamma de baja energía de densidad, espesor y nivel	3	20-50 kg	200-400 mm de diámetro × 300-700 mm de largo	

CUADRO 5. MASA Y DIMENSIONES DE VARIOS DISPOSITIVOS HABITUALES (cont.)

Dispositivo	Categoría	Masa habitual	Dimensiones habituales	Observaciones
Sonda beta de densidad y espesor	4	10-20 kg	100-300 mm de largo × 100-300 mm de ancho × 100-300 mm de alto	
Medidor de humedad de material a granel	3	10-1000 kg	300-1000 mm de largo × 300-500 mm de ancho × 300-500 mm de alto	
Densímetro/medidor de humedad del suelo	4	30 kg	200 mm de largo × 300 mm de ancho × 1000 mm de alto	
Aparato de fluorescencia de rayos X	5	Portátil: 2 kg Laboratorio y control de procesos: 20-100 kg	Portátil: 200 mm de largo × 100 mm de ancho × 100 mm de alto Laboratorio y control de procesos: 500 mm de largo × 500 mm de ancho × 1500 mm de alto	
Máquina de braquiterapia	2	50-250 kg	300-600 mm de largo × 300-600 mm de ancho × 800-1500 mm de alto	
Eliminador de electricidad estática	4	Barras: hasta 2 kg Pistolas: hasta 500 g	Barras: hasta 2000 mm de largo × 30 mm de ancho × 10 mm de profundidad Pistolas: 30 mm de diámetro × 80 mm de largo	
Pararrayos radiactivos	5	2-10 kg	100-300 mm de diámetro × 500-1000 mm de largo	
Señales autoluminiscentes	5	1-10 kg	Hasta 600 mm de largo × hasta 200 mm de ancho × hasta 100 mm de profundidad	
Detector de humo	5	100 -300 g	100-150 mm de diámetro × 15-30 mm de altura	

5. PRINCIPIOS Y REQUISITOS EN MATERIA DE GESTIÓN

La opción preferida de gestión de las fuentes selladas en desuso es reciclarlas para su uso posterior. Si esa posibilidad no es factible, la opción de gestión preferida para las fuentes selladas en desuso, y en todos los casos para las fuentes gastadas, es la devolución de la fuente a su proveedor. Si no se prevé su uso posterior y no se puede retirar de otro modo del control reglamentario, la única opción sostenible a largo plazo es la disposición final. Como tal, las fuentes en desuso para las que no existen opciones de reciclaje o repatriación deben declararse como desechos radiactivos y deben gestionarse como tales, de conformidad con los instrumentos jurídicos internacionales, las normas de seguridad y las buenas prácticas pertinentes.

El OIEA ha editado varias publicaciones relacionadas con las responsabilidades de seguridad en el marco de una infraestructura jurídica y gubernamental para garantizar la seguridad de las fuentes en sus Estados Miembros:

- En la publicación de Nociones Fundamentales de Seguridad titulada *Principios fundamentales de seguridad* [28] se establecen los objetivos, conceptos y principios de la protección y la seguridad y se sientan las bases de los Requisitos de Seguridad del OIEA, incluida la responsabilidad de los gobiernos de establecer un marco jurídico de seguridad a fin de prever el control reglamentario de las actividades relacionadas con las fuentes de radiación.
- En la publicación GSR Part 3, las NBS [11], se estipulan para las partes responsables, en particular para los titulares registrados, los licenciarios y los empleadores, los requisitos de establecer un sistema de control de las fuentes de radiación para garantizar su seguridad.
- En la publicación GSR Part 1, *Marco gubernamental, jurídico y regulador para la seguridad* [29], se estipulan los aspectos esenciales del marco gubernamental y jurídico para establecer un órgano regulador y adoptar otras medidas necesarias a fin de garantizar un control reglamentario eficaz.
- El Código de Conducta [14] establece principios rectores para que los Estados Miembros logren y mantengan un alto nivel de seguridad tecnológica y de seguridad física de las fuentes radiactivas. Un elemento importante del Código de Conducta consiste en que los Estados Miembros se aseguren de que se adopten disposiciones para la gestión y la protección seguras de las fuentes radiactivas una vez que hayan dejado de utilizarse.
- La Guía de Seguridad *Seguridad de los generadores de radiación y de las fuentes radiactivas selladas* [30] proporciona orientación sobre las responsabilidades en materia de seguridad dentro de la infraestructura jurídica y gubernamental, sobre las metodologías para realizar las evaluaciones de seguridad y sobre el diseño específico y las medidas operacionales y de diseño específicas que deberían adoptarse para garantizar la seguridad durante toda la vida útil de una fuente de radiación.
- La Guía de Seguridad *Control reglamentario de las fuentes de radiación* [31] proporciona orientación para poner en práctica una infraestructura de reglamentación nacional necesaria para alcanzar un adecuado nivel de protección y seguridad de las fuentes de radiación utilizadas en la medicina, la industria, la agricultura, la investigación y la enseñanza.

Como se desprende de las Normas de Seguridad y las Guías de Seguridad mencionadas, es necesario que se contemplen los siguientes elementos del sistema nacional para garantizar la gestión segura de las fuentes radiactivas en desuso:

- un conjunto racional de objetivos de seguridad y de protección radiológica y ambiental del que se pueden derivar normas y criterios en el marco del sistema de control reglamentario;
- identificación de todas las partes que intervienen en las diversas etapas de la gestión de las fuentes en desuso y especificación de sus responsabilidades;
- identificación de las fuentes en desuso existentes y previstas (registro nacional);
- recursos (financiación, capacidad técnica, dotación de personal, cualificación y capacitación del personal);
- sistema de gestión;
- información pública.

5.1. CONTROL REGLAMENTARIO

Independientemente del tipo de proceso de que se trate, la gestión de las fuentes en desuso debe llevarse a cabo de acuerdo con el marco regulador y de concesión de licencias de ámbito nacional y de conformidad con las recomendaciones internacionales. Es importante que los Estados Miembros elaboren medidas reglamentarias apropiadas para las prácticas de manipulación, acondicionamiento, transporte, almacenamiento y disposición final a nivel nacional. Para todas estas prácticas suelen hacer falta licencias de explotación, que definen el alcance de las operaciones, los límites de posesión de material radiactivo y las condiciones específicas que deben observarse [32]. Es necesario definir los requisitos legales para el mantenimiento de registros, como parte de un sistema de gestión, que a su vez puede formar parte de los requisitos para la concesión de licencias.

La mayoría de los países cuentan con varias leyes y reglamentos en vigor que rigen la seguridad y protección radiológica de las fuentes radiactivas. No existe una legislación específica que se ocupe de la gestión de las fuentes en desuso; sin embargo, en general se incluye en la legislación en materia de protección radiológica o de gestión de desechos. Si se determina que se necesita legislación nueva o complementaria, es necesario tomar cierta precaución para reducir al mínimo el solapamiento o el conflicto de los requisitos de seguridad y protección radiológica.

No todos los requisitos generales pueden ser necesarios o apropiados en circunstancias concretas. Es necesario que un Estado Miembro decida hasta qué punto los requisitos son aplicables en una situación particular. Además, las organizaciones involucradas pueden existir con una estructura diferente o pueden tener un nombre distinto. Para asegurar el cumplimiento, es importante diferenciar entre la índole reguladora del trabajo y los aspectos operacionales.

El control reglamentario de las fuentes a lo largo de su ciclo de vida garantizará la continuidad del control cuando las fuentes dejen de utilizarse y se vuelvan potencialmente más vulnerables a la pérdida. La información reunida como parte del régimen normativo también puede ser útil para pronosticar el número y los tipos de fuentes que ya no se utilizan, lo que permite determinar las necesidades futuras del plan de gestión de desechos.

5.2. RESPONSABILIDADES

Un concepto fundamental de la legislación es que la responsabilidad primordial de la seguridad radiológica recae en las personas autorizadas a poseer y utilizar, fabricar, suministrar o instalar fuentes de radiación. “La responsabilidad principal en cuanto a la seguridad se asignará a la entidad explotadora” (referencia [31], párrafo 2.3).

El órgano regulador necesita una autorización mediante licencia para todas las prácticas, distintas de aquellas a las que se aplica una exención, que no se consideren de otro modo como aptas para su mera notificación o registro [11]. En todos los casos, los explotadores que utilizan una fuente sellada deben, como mínimo, presentar en apoyo de la notificación y para solicitar la autorización la información descrita en los requisitos 3.32 y 3.33 de la publicación GS-R-1 [29]. La mayoría de los Estados Miembros cuentan con sistemas que datan de la época anterior a la compra de las fuentes actualmente en uso. Eso significa que es probable que todas las fuentes actualmente en uso estén cubiertas por una licencia.

Las fuentes selladas tienen un ciclo de vida que comienza con la fabricación y termina con la disposición final. Cada ciclo de vida de la fuente comprende una serie de pasos secuenciales, que se ilustran en la figura 43. En el ciclo de vida de una fuente pueden participar una serie de personas de diversas organizaciones, como el órgano regulador, el fabricante de la fuente, el fabricante del dispositivo, el distribuidor, los usuarios (uno o varios usuarios subsiguientes), la organización de procesamiento de desechos y el explotador de una instalación de almacenamiento y/o disposición final. La posible participación de un gran número de organizaciones y sus interacciones hacen que los ciclos de vida de las fuentes sean realmente complejos y a menudo difíciles de establecer.

La principal cuestión durante todo el ciclo de vida de una fuente radiactiva sellada es la protección de las personas o grupos contra la exposición involuntaria a la radiación y la minimización del riesgo por el uso doloso de las fuentes.

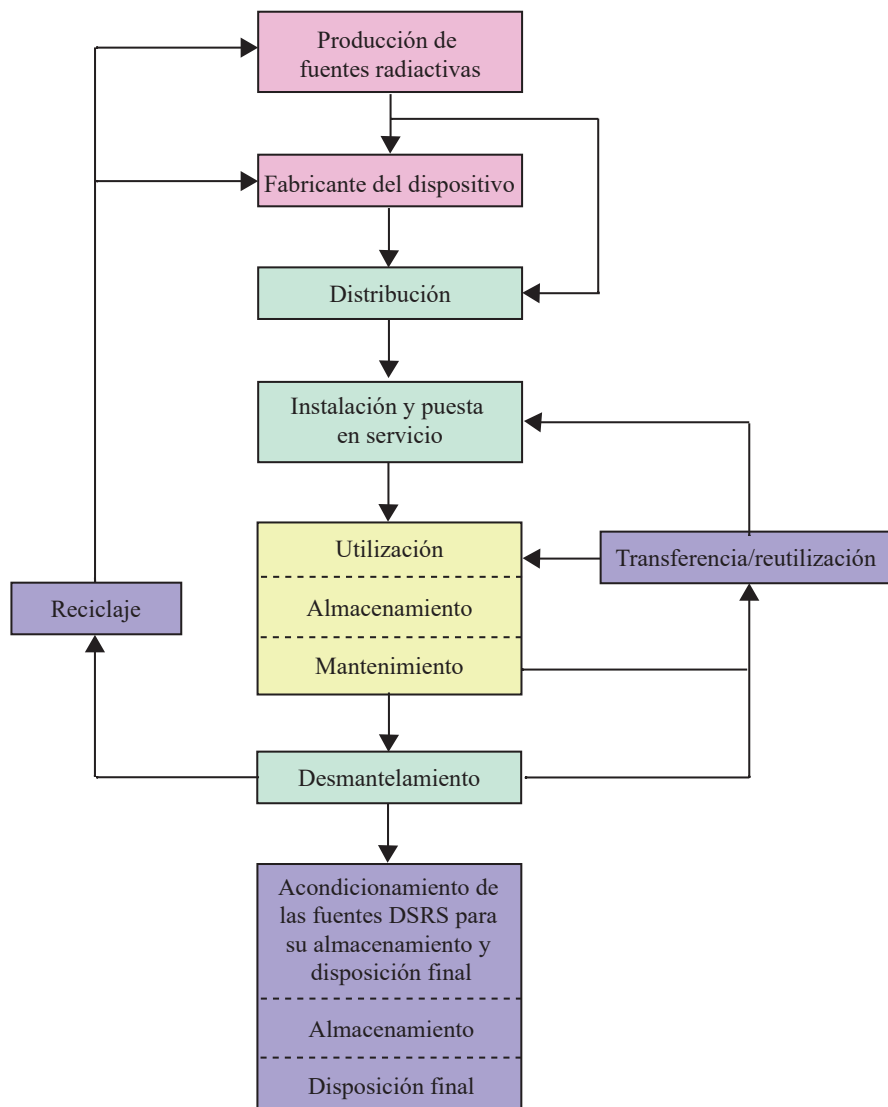


Fig. 43. Ciclo de vida de una fuente radiactiva.

5.2.1. Fabricante de la fuente

El *fabricante de la fuente* suele aceptar la propiedad del material radiactivo en el momento de la entrega por la instalación de producción de radioisótopos. El fabricante de la fuente es en ese momento responsable desde el punto de vista jurídico de la manipulación segura del material radiactivo en su posesión y de la posterior transferencia de propiedad.

El fabricante de la fuente debe suministrar al usuario y al órgano regulador un certificado de la fuente que contenga información completa sobre esta, como el modelo y el número de serie, el radionucleido, la actividad, la fecha de calibración, el tipo de cápsula, el número de certificado especial y la información del fabricante. Esta información es fundamental para demostrar que la información específica de la fuente cumple con los requisitos para la gestión de fuentes cuando quedan en desuso.

5.2.2. Fabricante del dispositivo o equipo

El *fabricante de un dispositivo o equipo* proporciona el equipo en el que se carga una fuente, ya sea antes del envío al emplazamiento del usuario o después de la instalación.

El fabricante del dispositivo debe cumplir las normas nacionales e internacionales de seguridad del equipo, incluida la aprobación del diseño por parte de la autoridad reguladora competente. Además, los reglamentos exigen que el fabricante del equipo proporcione al usuario toda la información necesaria para operar y mantener el equipo de manera segura y adecuada. Esa información comprende toda la información pertinente sobre la fuente y los procedimientos para su transporte, incluidos los medios para asegurar la fuente en condiciones de seguridad, los enclavamientos y la preparación para emergencias.

En el caso de las fuentes radiactivas de actividad alta, como las máquinas de teleterapia, el fabricante del equipo debe prestar servicios técnicos relacionados con la recarga periódica de las fuentes radiactivas.

5.2.3. Distribuidor

Un *distribuidor* autorizado por el órgano regulador se encarga de realizar algunas operaciones de transporte y suministro de conformidad con las leyes internacionales relativas al transporte de materiales radiactivos. Esas responsabilidades podrían incluir la verificación de que el destinatario es una persona o entidad autorizada para poseer material radiactivo de conformidad con los reglamentos nacionales y los requisitos de notificación aplicables.

El fabricante de la fuente o fabricante del equipo (que puede, según las condiciones de entrega, seguir siendo propietario de la fuente durante el transporte) y el distribuidor tienen responsabilidades compartidas durante las operaciones de transporte y suministro.

5.2.4. Usuario

El *usuario* suele aceptar la propiedad del material de la fuente en el momento de la entrega por el distribuidor. Los usuarios (titulares registrados y licenciarios) son responsables de establecer y aplicar las medidas técnicas y organizativas necesarias para garantizar la seguridad física y la seguridad tecnológica de las fuentes. El usuario es jurídicamente responsable de la manipulación segura del material radiactivo con arreglo a todas las leyes y licencias aplicables, y de la posterior transferencia de propiedad del material. Las condiciones de la licencia suelen exigir que el usuario conserve de forma segura una copia de la información del certificado de la fuente facilitada por el fabricante. Aunque normalmente no se necesita una licencia, el usuario debe conservar toda la información técnica sobre el equipo proporcionada por el fabricante.

Cuando quede en desuso, tras un breve almacenamiento en el emplazamiento, la fuente será trasladada a otro lugar donde se pueda asegurar su almacenamiento a largo plazo o su disposición final. Posteriormente se transfiere la propiedad a otra parte, como un fabricante de fuentes o una organización central de gestión de desechos radiactivos. En caso de que el usuario almacene la fuente antes de una transferencia formal de la propiedad (almacenamiento temporal), la responsabilidad en lo que concierne a los problemas de seguridad tecnológica y de seguridad física durante el almacenamiento provisional de la fuente recae en el usuario.

5.2.5. Organización central de gestión de desechos radiactivos

Una organización central de gestión de desechos radiactivos ofrece la manipulación, el acondicionamiento y el almacenamiento de las fuentes en desuso después de diversas aplicaciones en el país. Es legalmente responsable del acondicionamiento y almacenamiento en condiciones de seguridad tecnológica y física de las fuentes de su propiedad, y normalmente opera en virtud de condiciones de licencia establecidas por un órgano regulador. Esa responsabilidad se extingue cuando la fuente se ha desintegrado lo suficiente como para que se realice su disposición final como material no peligroso, o cuando la fuente se transfiere legalmente a otra organización, como una instalación de disposición final. Como requisito en el marco de su licencia, una organización central de gestión de desechos radiactivos mantiene un inventario actualizado de todas las fuentes en su posesión, incluida toda la información específica que facilite el fabricante de la fuente.

En caso de que un licenciario sea incapaz de gestionar las fuentes en desuso, o de que la licencia sea revocada, o de que el licenciario ya no exista, la organización central de gestión de desechos radiactivos puede hacerse cargo de la gestión general de las fuentes en desuso, si así lo solicita el órgano regulador.

En los países grandes, en lugar de una sola organización central de gestión de desechos radiactivos, podría haber varias organizaciones regionales que operen con las mismas funciones.

5.2.6. Instalación de disposición final

Una *instalación de disposición final* de desechos es legalmente responsable de todos los desechos radiactivos, incluidas las fuentes DSRS aceptadas para su disposición final. En la mayoría de los países se trata de una instalación centralizada que presta servicios para la disposición final de las fuentes DSRS que se reciben de todos los usuarios del país. La instalación de disposición final puede llevar a cabo algunos acondicionamientos y operaciones asociadas en el emplazamiento; en ese caso, su licencia de explotación debería comprender también esas actividades e instalaciones, de haberlas.

5.3. REGISTRO DE LAS FUENTES RADIATIVAS SELLADAS

Una preocupación específica en el manejo de las fuentes DSRS es asegurar que las fuentes selladas sean controladas adecuadamente después de que dejen de utilizarse. Para ello es necesario hacer un seguimiento de una fuente durante todo su ciclo de vida, comprometerse a realizar su disposición final antes de importarla y establecer y aplicar un plan para la gestión segura de la fuente después de que se declare en desuso.

En el Código de Conducta [13] se pide a los órganos reguladores nacionales que establezcan y mantengan un *registro nacional* de determinadas fuentes radiactivas selladas. Este registro debería, como se indica en el párrafo 11 del Código de Conducta, por lo menos, incluir las fuentes radiactivas de las categorías 1 y 2. Con el fin de facilitar el intercambio de información sobre las fuentes radiactivas entre los Estados Miembros, es importante que estos se esfuercen por armonizar los formatos de sus registros.

Es necesario que el licenciataria establezca un *sistema de registro para rastrear todas las fuentes en posesión de los usuarios* y que este sea compatible con el sistema de registro nacional. El sistema debería estar diseñado para permitir que los datos sean fácilmente accesibles y recuperables, así como seguros. Un sistema de registro aceptable puede ir desde un sistema manual (como los ficheros) hasta una base de datos informatizada. El licenciataria debe notificar al órgano regulador todos los cambios significativos en la información del sistema de mantenimiento de registros. El licenciataria debería asegurarse de que exista un procedimiento para comunicar sistemáticamente al órgano regulador información detallada sobre la situación de la fuente y la información requerida para la presentación de informes.

Un sistema de registro de fuentes, como mínimo, debería incluir los siguientes particulares [30]:

- a) número de serie o identificador único;
- b) número y referencia del tipo de fabricante en que pueden encontrarse los detalles de construcción;
- c) radionucleido (símbolo elemental y número isotópico);
- d) actividad en una fecha especificada;
- e) forma física;
- f) propiedades físicas y químicas, incluso las emisiones principales (alfa, beta, gamma, n);
- g) ubicación de la fuente;
- h) cuando no se desprenda de otro modo de los registros anteriores, detalles del dispositivo o equipo con que se utiliza la fuente, si resulta indispensable para la seguridad;
- i) cuando corresponda, un historial de uso de la fuente (p. ej., un diario de operaciones de manipulación de la fuente);
- j) detalles de la recepción o transferencia o disposición final de la fuente.

5.4. DECLARACIÓN DE LAS FUENTES EN DESUSO

Hay varios factores que pueden llevar a que las fuentes radiactivas dejen de utilizarse. A continuación se examinan de manera más pormenorizada algunas de las principales razones por las que se considera que una fuente está en desuso o gastada.

5.4.1. Reducción de la actividad

En todas las fuentes radiactivas selladas hay una actividad mínima por debajo de la cual la fuente ya no es útil para su propósito específico y, por lo tanto, se considera gastada (en desuso). En la mayoría de las aplicaciones, es necesario sustituir la fuente cuando la actividad inicial ha disminuido por un factor que depende de la aplicación concreta. Las fuentes de radiografía industrial que contienen ^{192}Ir , cuyo período de semidesintegración es de solo 74 días, se consideran generalmente gastadas en dos o tres meses después de su compra debido a la desintegración radiactiva, mientras que las fuentes de ^{60}Co que se utilizan para la radiografía industrial o la teleterapia necesitan sustituirse cada 5 a 10 años. La vida útil de las fuentes de ^{60}Co producidas para los irradiadores industriales puede ser de 15 a 20 años. Estas fuentes suelen permanecer en uso hasta que su actividad disminuye hasta el 10 %-15 % o el valor original. Aunque las fuentes gastadas pueden no ser útiles para el fin original, cabe la posibilidad de que sigan siendo altamente radiactivas, lo que plantea un posible peligro de radiación para las personas y el medio ambiente, incluso después de que hayan transcurrido varios períodos de semidesintegración.

5.4.2. Fuga o daño

Las fuentes con fugas o con daños físicos (por ejemplo, dobladas, corroídas, agrietadas o muy arañadas) se consideran en desuso, se retiran inmediatamente del servicio y se gestionan posteriormente como desechos radiactivos.

5.4.3. Equipo obsoleto

Todos los equipos (dispositivos) acabarán llegando al final de su vida útil. Si bien la fuente puede tener todavía una resistencia suficiente, es posible que el equipo ya no sea utilizable (por ejemplo, el calibrador de humedad/densidad con componentes electrónicos obsoletos). Una fuente asociada a un equipo obsoleto se considera una fuente radiactiva en desuso.

5.4.4. Tecnología alternativa

Una fuente radiactiva sellada se fabrica generalmente para una función específica. La función puede ser tratar un tumor, evaluar la calidad de una soldadura, controlar los procesos industriales o esterilizar productos médicos desechables. La fuente proporciona la radiación ionizante que hace falta en el proceso. Incluso si la fuente sigue proporcionando el producto de radiación necesario, el proceso puede quedar fuera de uso porque se han desarrollado procedimientos alternativos para lograr los resultados deseados. Siempre que es posible, tanto los usuarios como los fabricantes están avanzando hacia tecnologías que no requieren fuentes radiactivas, por ejemplo:

- sustitución del ^{241}Am en los detectores de humo con ionización por dispositivos ópticos;
- transición a detectores de rayos X en las aplicaciones de control de procesos, especialmente las que requieren ^{241}Am y ^{244}Cm ;
- métodos ultrasónicos de medición de densidad y nivel en lugar de ^{137}Cs ;
- aceleradores lineales en lugar de teleterapia de ^{60}Co .

El procedimiento alternativo podría utilizar posiblemente un tipo diferente de fuente con el que sea más fácil trabajar o que sea más sencillo de gestionar como desecho al final de su ciclo de vida.⁴ La técnica alternativa también puede utilizar un compuesto químico más estable,⁵ un nivel más bajo de radiación, generadores o aceleradores de radiación o de partículas (máquina de rayos X o acelerador lineal) en lugar de material radiactivo, o puede implicar una técnica que no utilice en absoluto la radiación ionizante.

⁴ Por ejemplo, ^{137}Cs en lugar de ^{226}Ra para radioterapia y ^{192}Ir en vez de ^{137}Cs para radiografía industrial.

⁵ Por ejemplo, la forma en vidrio o cerámica de ^{137}Cs en lugar de CsCl .

5.4.5. Cambios en las prioridades

Una fuente sellada se considera en desuso si el experimento o programa en que se utiliza una fuente específica finaliza o se termina. Algunas empresas u organizaciones pueden cambiar de ámbito de trabajo o poner fin a sus programas de investigación, lo que da lugar a fuentes que ya no son necesarias. Esas fuentes se consideran fuentes en desuso, cuya propiedad se transfiere posteriormente a una organización autorizada para su posible reutilización, acondicionamiento, almacenamiento o disposición final.

5.4.6. Fuentes huérfanas

Una fuente huérfana es una fuente radiactiva que no está sometida a control reglamentario, sea porque nunca lo ha estado, sea porque ha sido abandonada, perdida, extraviada, robada o transferida sin la debida autorización [1, 14]. Las fuentes huérfanas pueden tener graves consecuencias para la salud pública y el medio ambiente. Exigen una acción inmediata (por ejemplo, notificación o búsqueda). Cuando se encuentra una fuente, hay que someterla a pruebas y descubrir si tiene fugas antes de seguir gestionándola. Por otro lado, las fuentes que recupera un tercero y que se identifican como radiactivas pero no se pueden rastrear hasta el titular autorizado se consideran fuentes en desuso.

5.5. FINANCIACIÓN

Las partes principales⁶ deben asegurarse de que: “Se han establecido disposiciones financieras de conformidad con los requisitos reglamentarios para la gestión segura de las fuentes en desuso” [32]. Un Estado Miembro debe asegurarse de que una práctica o instalación de gestión de desechos esté debidamente financiada y se establezca un mecanismo de financiación.

Dado que es probable que la disposición de las fuentes DSRS tenga lugar varios decenios (o más) en el futuro (posiblemente después de que los generadores de las fuentes en desuso hayan cesado su actividad), es prudente reunir los recursos financieros que se necesitarán para las operaciones futuras mientras los usuarios sigan con su actividad. Los Estados Miembros utilizan diversos sistemas financieros para garantizar la disponibilidad a largo plazo de recursos financieros para el desmantelamiento y la disposición final. Los fondos y las reservas son los dos mecanismos de financiación más comunes. Los recursos financieros suelen estar a cargo de organizaciones independientes de los generadores de desechos. En algunos países, la financiación de la gestión de los desechos radiactivos está garantizada por el presupuesto nacional.

5.5.1. Distribución de los costos

Todas las partes que poseen material radiactivo durante el proceso de fabricación, transporte, aplicación, acondicionamiento y almacenamiento de las fuentes suelen transferir la propiedad del material a otra parte. Los usuarios finales de la fuente normalmente incurrirán en los gastos de gestión de la fuente en desuso, que pueden ser considerables, especialmente en el caso de las fuentes de actividad alta (categorías 1 y 2) y las fuentes que contienen radionucleidos de período largo. El costo de los contenedores de transporte y los costos de transporte propiamente dicho también se transfieren al usuario como los costos de las fuentes y la sustitución de estas. Esos gastos, que son necesarios para cumplir los requisitos legales y de seguridad, se convierten en costos adicionales para el usuario. Sin embargo, el Estado Miembro está obligado a proporcionar fondos públicos, en el caso de las fuentes huérfanas, cuando se pierda la información sobre la propiedad o cuando las consideraciones de seguridad pública sean primordiales. En caso de que el propietario de una instalación se declare insolvente, o de que se cierre una instalación por abandono, guerra, desastre natural, etc., puede que el método con el que suponía que se iba a financiar la transferencia de la propiedad de la fuente ya no sea viable. Es posible que se disponga de seguros o fondos de emergencia de organismos públicos para ayudar en esas circunstancias; de lo contrario, los costos de la transferencia de propiedad deberán ser sufragados por otras instituciones que tal vez no hayan participado en los

⁶ En las NBS [11] se establece que: “Los principales responsables de la aplicación de las Normas serán: a) los titulares registrados y titulares de licencias; y b) los empleadores”.

beneficios con los que se adquirió la fuente. Con el tiempo, el material estará depositado en la organización central de gestión de desechos radiactivos, donde o bien se desintegrará hasta un nivel seguro o bien se retendrá hasta su transferencia a un centro de disposición final.

Los costos de propiedad y transferencia de material radiactivo durante la fabricación y sustitución de una fuente sellada se reflejan en el precio de compra de la fuente original y de la de sustitución, ya que este suele ser el medio por el que el fabricante recupera sus costos.

Cuando se sustituye una fuente, el fabricante suele recuperar la fuente gastada como parte de la transacción. Sin embargo, cuando la instalación se clausure definitivamente, la propiedad y la transferencia de la fuente final del equipo deberán manejarse como parte del costo para el usuario asociado a la restitución de la instalación al uso general. En esencia, los costos totales de propiedad y transferencia forman parte del costo total para el usuario por la prestación del servicio para el que se adquirió la fuente. En el caso de las fuentes de actividad alta, esos servicios incluyen la radiografía industrial, la irradiación de materiales, la esterilización y el tratamiento contra el cáncer.

5.5.2. Incertidumbre de los costos

Tanto el usuario como el fabricante de la fuente incurren en costos para la obtención de licencias y en costos de explotación como parte de los requisitos reglamentarios. Los órganos reguladores conceden licencias a las instalaciones que gestionan materiales radiactivos y realizan inspecciones, y al menos algunos de los costos de esas actividades se transfieren al titular de la licencia en concepto de tasas de licencia. Los costos de la licencia reglamentaria para la instalación de irradiación y para el fabricante de la fuente se incorporan normalmente en el precio de las fuentes que se entregan al usuario, y los costos del usuario se convierten en un gasto de explotación que se sufraga durante el tiempo de utilización de la fuente. El costo de las licencias de los bultos de transporte y los gastos de transporte también se transfieren al usuario en los costos de las fuentes y de la sustitución de estas. Esos gastos, que son necesarios para cumplir los requisitos legales y de seguridad, se convierten en costos adicionales para el usuario.

Los costos de manipulación, acondicionamiento y almacenamiento suelen ser fijados por la organización central de gestión de desechos radiactivos a un nivel realista para evitar que las medidas de seguridad se vean comprometidas. Los costos excesivos pueden hacer que los explotadores actúen de manera inapropiada abandonando las fuentes o deshaciéndose ilegalmente de ellas. Los costos exactos de acondicionamiento y almacenamiento de las fuentes radiactivas selladas no se pueden establecer con precisión, pero se pueden estimar. La existencia de fondos suficientes para la construcción y la explotación de instalaciones de acondicionamiento y almacenamiento es un requisito previo para la gestión segura de las fuentes en desuso. También hay que considerar los costos adicionales de cualquier reacondicionamiento de las fuentes. El costo del almacenamiento a largo plazo, el tiempo de espera para la disposición final y el costo de la disposición final son componentes esenciales de cualquier estudio de costos.

5.5.3. Falta de disponibilidad de una vía para la transferencia de la propiedad

En el momento del desmantelamiento del equipo, es posible que el fabricante o distribuidor de la fuente original haya cesado su actividad o no pueda recuperar la fuente debido a la antigüedad o el estado del equipo o a los cambios en los reglamentos aplicables. Si el transporte a la organización central de gestión de desechos radiactivos no es factible, el usuario tendrá que almacenar la fuente en condiciones de seguridad tecnológica y física hasta que se disponga de una opción adecuada. Aunque no es probable que ello entrañe un costo anual elevado, la prórroga del almacenamiento conllevará costos de mano de obra y de mantenimiento. El tiempo de almacenamiento podría superar la capacidad de la instalación para garantizar de manera fiable un almacenamiento en condiciones de seguridad tecnológica y física, y podría de hecho rebasar la vida operacional de la instalación. Se debería solicitar una autorización (licencia) nueva (diferente) para el almacenamiento de una fuente DSRS al órgano regulador, que ha de aprobarla. En estas situaciones, el costo de la propiedad y la transferencia de la fuente se aplaza mediante el almacenamiento temporal, pero no se resuelve.

5.6. CAPACIDAD TÉCNICA

Es necesario desarrollar y mantener una capacidad técnica apropiada en todos los emplazamientos en que se explotan o gestionan fuentes en desuso. Esa capacidad incluye la propia instalación, el equipo apropiado y la competencia técnica del personal. La adquisición y la explotación de las instalaciones y el equipo deben estar en consonancia con la capacidad técnica disponible para facilitar la explotación eficaz y segura. La gestión de las fuentes en desuso es necesaria tanto en el emplazamiento del usuario como en la organización central de gestión de desechos, donde se procesan y almacenan las fuentes selladas, en espera de su disposición final definitiva.

5.6.1. Emplazamiento del usuario

Cada usuario necesita capacidad técnica para recoger, manipular, caracterizar, segregar y almacenar de forma segura y a corto plazo las fuentes que posee. Es posible que el usuario no necesite conocer los detalles de cómo se gestionará posteriormente la fuente en desuso, si la labor de acondicionamiento y almacenamiento se deja en manos de los operadores de las instalaciones centralizadas de acondicionamiento y almacenamiento. Sin embargo, el usuario debería ser informado sobre las etapas posteriores de la gestión de la fuente a fin de valorar la necesidad de segregar o clasificar adecuadamente las fuentes durante la recogida. Se trata de un aspecto que también es importante para descartar la posibilidad de que el usuario procese la fuente de cualquier manera que complique o encarezca los futuros procedimientos de gestión de desechos, o que dé lugar a riesgos adicionales indebidos.

5.6.2. Organización central de gestión de desechos radiactivos

Dado que las operaciones técnicas más avanzadas (acondicionamiento y almacenamiento) se llevan a cabo en la organización central de gestión de desechos radiactivos, esta debería estar dotada de todo el equipo, herramientas e instrumentos necesarios en función de las tareas que se le han asignado y de las características de las fuentes en desuso que acepta para su procesamiento. En las secciones 7 a 10 se presentan los requisitos del equipo técnico y algunos ejemplos utilizados en una organización central de gestión de desechos radiactivos.

5.6.3. Instalación de disposición final

Una instalación de disposición final acepta las fuentes DSRS para su disposición final, y para poder ejecutar esa función debe estar equipada con el equipo de manipulación e izado adecuado. El diseño de una instalación de disposición final puede incluir diferentes barreras artificiales. Es necesario adoptar varias medidas para respaldar las propiedades de las barreras artificiales de acuerdo con el objetivo del diseño. En caso de control institucional, debe garantizarse su sostenibilidad. Los requisitos del diseño de una instalación de disposición final se describen en la sección 12.

5.7. FORMACIÓN DEL PERSONAL

Los procesos de manipulación y acondicionamiento requieren personal cualificado con conocimientos técnicos y experiencia práctica adecuados, autodisciplina y responsabilidad para la ejecución de un trabajo de alta calidad. La comprensión del diseño, la construcción y el montaje de la fuente en el dispositivo, así como el diseño y la función del propio dispositivo, son también consideraciones importantes, sobre todo cuando se intenta retirar una fuente del dispositivo. Como este trabajo suele implicar un alto nivel de actividad manual, es importante que el personal que lo realice esté físicamente en forma.

No es posible prescribir el número y el tipo de destrezas de las personas que se necesitan en las diversas operaciones de gestión de las fuentes DSRS. Las recomendaciones generales del OIEA sobre las cualificaciones del personal recomendadas para los trabajos radiológicos, como las tareas de acondicionamiento [15], se describen en el cuadro 6.

CUADRO 6. CUALIFICACIONES Y EXPERIENCIA DEL PERSONAL [15]

Personal	Cualificación/experiencia ^a
Gestor de operaciones	Persona con una formación técnica adecuada, con experiencia en la gestión de fuentes DSRS
Oficial/supervisor de protección radiológica	Experiencia en procedimientos y reglamentos de protección radiológica ^b
Gestor de tareas	Experiencia en los métodos de acondicionamiento seleccionados, el acondicionamiento de las operaciones y el control de calidad ^c
Operador cualificado	Experiencia práctica en el manejo de material radiactivo ^c

^a Los programas de capacitación deben ofrecerse según sea necesario.

^b El personal de protección radiológica debería tener experiencia en el trabajo con las fuentes radiactivas selladas de los tipos y actividades que se van a acondicionar. De ser posible, es deseable que tengan experiencia específica en los dispositivos de los que se han de extraer las fuentes, pero como mínimo se requiere experiencia con fuentes y dispositivos similares.

^c Los operadores que retiren las fuentes del equipo tendrán formación y experiencia en todas las herramientas y equipos que vayan a retirar y, cuando sea posible, experiencia práctica en los dispositivos específicos de los que se retirarán las fuentes. Esto es especialmente importante cuando se planifica el acondicionamiento de fuentes de actividad alta o la disposición final de fuentes instaladas en calibradores, instrumentos u otros dispositivos. Si no se dispone de operadores experimentados, instrucciones para la disposición final de la fuente u otra experiencia técnica específica, se deben retener las cualificaciones individuales para realizar el trabajo.

A diferencia de las actividades generales de protección radiológica, la manipulación de fuentes implica actividades más altas de material radiactivo y concentraciones de este material en configuraciones con un potencial de exposiciones elevadas y una grave dispersión de material radiactivo en caso de un suceso inapropiado o no planificado. Esas preocupaciones deben evaluarse cuando se designe que los trabajadores están cualificados para realizar esas actividades.

La capacitación de los operadores y el personal de protección radiológica en la manipulación y el acondicionamiento de las fuentes debería ser específica para cada tipo de dispositivo que se vaya a manipular y para las fuentes que se vayan a acondicionar y, cuando sea posible, la labor se basará en el documento en que se definan los pasos y las técnicas para la disposición final de la fuente, si es necesario. Preferiblemente ese documento provendrá del fabricante del dispositivo; sin embargo, el uso de documentos elaborados por personal con experiencia en la realización del trabajo es una alternativa razonable. La capacitación y la experiencia deberían ser suficientes para que las personas que realizan el trabajo reconozcan los tipos y grados de peligros radiológicos que se presentan con cada paso; las diferencias entre los dispositivos producidos por diferentes fabricantes para el mismo fin, y las medidas que deben adoptarse en caso de un problema o anomalía en el desempeño del trabajo. Si se requiere personal de seguridad (por ejemplo, durante el almacenamiento), es necesario que reciba periódicamente capacitación básica en materia de protección radiológica y se familiarice con los procedimientos de emergencia.

El órgano regulador no suele tener la responsabilidad de actuar como explotador de una instalación de gestión de desechos; sin embargo, se exige que los reguladores tengan los conocimientos y la experiencia necesarios para administrar las leyes y los reglamentos y proporcionar una orientación y dirección claras a los explotadores de las instalaciones de gestión de desechos.

5.8. SISTEMA DE GESTIÓN

En el principio 3 de los Principios fundamentales de seguridad [28] se estipula que “deben establecerse y mantenerse un liderazgo y una gestión que promuevan eficazmente la seguridad en las organizaciones que se ocupan de los riesgos asociados a las radiaciones, y en las instalaciones y actividades que los generan. La

seguridad debe lograrse y mantenerse mediante un sistema de gestión eficaz”.⁷ El sistema de gestión es el conjunto de elementos interrelacionados e interactuantes que establece políticas y objetivos y que posibilita que se cumplan esos objetivos de manera segura, eficaz y efectiva. Ese sistema ha de integrar todos los elementos de la gestión de modo que los requisitos de la seguridad se definan y apliquen de forma coherente con otros requisitos, incluidos los relativos al desempeño humano, a la calidad, a la seguridad física y a la economía; y de modo que la seguridad no se vea comprometida por otros requisitos o exigencias. El sistema de gestión debe también garantizar la promoción de una cultura de la seguridad, la evaluación periódica del comportamiento de la seguridad y la aplicación de las enseñanzas aprendidas a partir de la experiencia. Estará alineado con el logro de los objetivos de seguridad de la organización, los cuales posibilitará.

Los requisitos generales del sistema de gestión se establecen en los Requisitos de Seguridad del *Sistema de gestión de instalaciones y actividades* [32] y las recomendaciones de la Guía de Seguridad complementaria sobre la *Aplicación del sistema de gestión de instalaciones y actividades* [33], que sustituye al anterior *Código sobre la garantía de calidad* [34]. La orientación sobre la aplicación del sistema de gestión para el procesamiento, la manipulación y el almacenamiento de los desechos radiactivos se presenta en la referencia [35]. La orientación sobre la aplicación del sistema de gestión para la disposición final de los desechos radiactivos se presenta en la referencia [36]. Los requisitos básicos para la protección radiológica se establecen en la referencia [11] y los requisitos para la preparación y respuesta para casos de emergencia, en la referencia [37].

5.8.1. Retos del sistema de gestión

La gestión de las fuentes DSRS implica una variedad de actividades técnicas y de gestión y puede extenderse durante un período de tiempo muy largo. Esas características presentan una serie de retos para el establecimiento y la aplicación de sistemas de gestión eficaces. Los siguientes aspectos merecen una consideración particular a la hora de establecer un sistema de gestión de las fuentes DSRS:

- a) El suministro de fondos y las disposiciones organizativas para gestionar las fuentes DSRS podrían recibir una atención insuficiente si se desvincularan de los beneficios obtenidos de la actividad que las genera. La organización y la financiación de las actividades de gestión de las fuentes DSRS necesarias podría ser mucho más difícil de poner en marcha más adelante.
- b) Las fuentes DSRS pueden manejarse con seguridad de manera provisional, en muchos casos por períodos prolongados. En consecuencia, la selección y aplicación de soluciones definitivas puede posponerse mediante una serie de aplazamientos a corto plazo para evaluar de nuevo las opciones.
- c) Si no se ha elegido la disposición final definitiva para las fuentes DSRS, puede ser difícil definir la forma preferible del bulto de fuentes DSRS que se producirá y mantendrá durante el almacenamiento, y la forma aceptable de los bultos para la disposición final definitiva. En tal situación, la elección de los métodos de acondicionamiento debe contrarrestar dos preocupaciones. En primer lugar, debería evitarse la exclusión de futuras opciones de disposición final (por ejemplo, al optar por producir un bulto provisional que no pueda someterse a la disposición final y que sea difícil de convertir en un bulto definitivo que sea adecuado para la disposición final). En segundo lugar, la incertidumbre sobre el punto final no debería utilizarse como justificación para no tomar medidas con miras a asegurar que las fuentes DSRS se gestionen de manera segura y ambientalmente aceptable en espera de su disposición final.

Los sistemas de gestión de las actividades de las fuentes DSRS deberían alentar la adopción de enfoques y soluciones unificados y de las prácticas óptimas internacionales debido a la necesidad de garantizar la continuidad entre las sucesivas generaciones de seres humanos y a la incertidumbre a largo plazo de las estructuras organizativas, nacionales e internacionales.

⁷ En la actualidad se utiliza “sistema de gestión” en lugar de “garantía de calidad”. “Sistema de gestión” refleja e incluye la evolución del enfoque desde el concepto inicial de “control de calidad” (control de la calidad de los productos), pasando por la “garantía de calidad” (el sistema para asegurar la calidad de los productos) hasta la “gestión de la calidad” (el sistema para gestionar la calidad).

5.8.2. Procedimientos del sistema de gestión

El sistema de gestión debería abarcar todas las actividades que se lleven a cabo a los efectos de la gestión de las fuentes DSRS, independientemente de que sean actividades individuales o compuestas [33]. El sistema de gestión debería garantizar que la actividad (por ejemplo, el acondicionamiento) o el producto (por ejemplo, el bulto de DSRS) cumplan con todos los requisitos aplicables, respetando los principios de seguridad. El sistema de gestión debería incluir las medidas que han de adoptarse en caso de que se produzcan bultos de DSRS no conformes.

Los procedimientos del sistema de gestión que deberían establecerse y aplicarse incluyen:

- a) graduación;
- b) documentación y registro;
- c) establecimiento y control de procesos;
- d) inspección y pruebas;
- e) compras;
- f) medidas de no conformidad y medidas correctivas;
- g) revisión del sistema de gestión.

5.8.3. Enfoque graduado

Las organizaciones que participan en la gestión de las fuentes DSRS deberían determinar la importancia relativa de las diversas actividades, instalaciones, equipo y bultos de fuentes DSRS para cumplir los requisitos generales de seguridad tecnológica, salud, medio ambiente, seguridad física, calidad y economía, teniendo en cuenta la importancia primordial de la seguridad tecnológica y la protección ambiental. La aplicación de los requisitos del sistema de gestión se graduará para desplegar los recursos a los niveles apropiados, de acuerdo con:

- la importancia y la complejidad de cada producto o actividad;
- los peligros y el posible impacto (riesgo) asociados a cada producto y actividad en la seguridad tecnológica, la salud, el medio ambiente, la seguridad física, la calidad y los elementos económicos;
- las consecuencias de un fallo del producto o del desarrollo incorrecto de una actividad.

La clasificación tiene por objeto orientar el grado de control que se aplica a un artículo en relación con la importancia de su función requerida. No debería utilizarse como justificación para no aplicar todos los elementos necesarios del sistema de gestión o los controles de calidad exigidos. Por graduación se entiende ajustar proporcionalmente el rigor de los controles mediante los que se evalúa la idoneidad de esas actividades a la importancia de estas.

5.8.4. Gestión de registros

Las actividades de gestión de las fuentes DSRS varían en tamaño y complejidad, pueden implicar a varias organizaciones y pueden continuar durante períodos prolongados (por ejemplo, el almacenamiento en espera de la disposición final). Se debería prestar especial atención a garantizar que los documentos utilizados para controlar los procesos de trabajo sigan siendo pertinentes, actuales y comprensibles y sigan estando disponibles para las diversas organizaciones y en las situaciones en que se utilizan y se utilizarán.

Los registros completos de todas las etapas de la gestión de la fuente son esenciales como referencia en el futuro. Esos registros incluyen la información sobre el origen y las características de la fuente, los procedimientos técnicos aplicados, los diseños de las cápsulas, el blindaje, los contenedores, el embalaje y el sobreembalaje, y los datos sobre el lugar y las condiciones de almacenamiento, incluidas la evaluación, la inspección y las verificaciones relativas a todas las actividades. Todos esos datos se necesitarán más adelante para respaldar las decisiones posteriores de proceder a la disposición final directa de las fuentes acondicionadas o a su reacondicionamiento para cumplir con los criterios de aceptación de desechos vigentes en la instalación de disposición final.

Las autoridades responsables, los usuarios de las fuentes y los explotadores de las instalaciones de gestión de desechos deben establecer y mantener documentación y registros acordes con los requisitos legales y de gestión y con sus propias necesidades. Esos registros deben mantenerse en un estado que permita su recuperación posterior

por personas distintas del personal que participó inicialmente en las operaciones, y posiblemente sin referencia a quienes generaron los registros. Los requisitos para la conservación de registros incluyen, entre otros, los siguientes:

- designación de los registros como permanentes o temporales;
- almacenamiento de registros temporales durante un período de tiempo determinado;
- almacenamiento de registros permanentes a perpetuidad;
- designación del método de almacenamiento de registros;
- recuperación de los registros;
- sistemas y procesos de seguridad suficientes para impedir la eliminación o modificación no autorizadas de los registros.

Las copias impresas bien conservadas, las microfichas y los soportes ópticos o magnéticos son posibles opciones para conservar datos de interés. Por lo menos dos soportes y dos lugares de registro son esenciales a los fines de diversidad y fiabilidad. Los registros deben actualizarse y transferirse a medida que evoluciona la tecnología en materia de registros.

Es necesario incluir registros de las fuentes con los detalles del proceso de acondicionamiento de cada bulto. Los datos registrados deberían incluir una descripción del procedimiento de acondicionamiento utilizado y los nombres de los miembros del equipo que realizaron la operación. Cualquier registro antiguo encontrado después del acondicionamiento debe añadirse a la información de cada bulto de desechos. Los registros fotográficos pueden resultar valiosos al revisar la documentación para planificar la disposición final.

5.8.5. Establecimiento y control de procesos

El sistema de gestión debería formalizarse para garantizar que las instalaciones de gestión de fuentes DSRS se diseñen, construyan y funcionen de forma segura de acuerdo con los requisitos especificados; que los bultos de fuentes DSRS recibidos se produzcan de la misma forma sistemática; que se cumplan los requisitos de aceptación de desechos para el transporte, el almacenamiento y la disposición final; y que se satisfagan todos los reglamentos y las condiciones de la licencia.

En la gestión se debería admitir que todas las actividades son procesos que pueden planificarse, realizarse, evaluarse y mejorarse, reconociendo al mismo tiempo que cada persona que realiza esas actividades es responsable de la calidad.

El control de los resultados de las instalaciones de gestión de fuentes DSRS incluye elementos como el control y la verificación del diseño, el examen por homólogos, la recopilación de datos y el control del *software*, las especificaciones de los bultos de fuentes DSRS y el control de los bienes y servicios adquiridos. También se evalúan las características de gestión relacionadas con los resultados:

- desempeño y cualificaciones del personal, y aceptación de elementos y servicios;
- control de los procesos de trabajo, incluidas las interfaces entre la generación, la recuperación, el procesamiento, el almacenamiento y la disposición final de las fuentes DSRS;
- operaciones de almacenamiento, manipulación y envío para prevenir accidentes y el deterioro de los contenedores y garantizar la validez de las operaciones analíticas;
- control de los bultos de fuentes DSRS y de la situación operacional, incluidos los paquetes no conformes y el equipo operacional de calidad inferior;
- identificación y control de elementos importantes para la seguridad, incluidas la inspección de aceptación y las pruebas;
- puntos de retención para la inspección, vigilancia y monitorización de los procesos;
- identificación de las zonas críticas para la inspección;
- control del equipo de medición y para la realización de pruebas.

5.9. PREPARACIÓN Y RESPUESTA PARA CASOS DE EMERGENCIA

Si existe la posibilidad de que se produzcan accidentes que puedan causar una exposición imprevista de cualquier persona (las fuentes manipuladas pueden perder su blindaje o comenzar a derramar material radiactivo durante las operaciones), el explotador debería asegurarse de que se prepare, se ponga en funcionamiento y se mantenga actualizado un plan de emergencia apropiado para el inventario de fuentes y sus riesgos asociados. El plan de emergencia debe definir las responsabilidades en el emplazamiento y tener en cuenta las responsabilidades externas de otras organizaciones competentes que participan en la aplicación del plan de emergencia.

Los Estados Miembros también deben prever la planificación y la preparación para casos de emergencia y adoptar las disposiciones que sean necesarias para responder a un accidente [37-39]. En algunos casos, la capacidad de respuesta de emergencia existente en el país es razonablemente adecuada para responder a un nivel apropiado (es decir, servicios de comunicación, protección contra incendios, control de tráfico, ambulancias y servicios médicos). Es responsabilidad de los explotadores y del órgano regulador informar a las autoridades locales y al personal de respuesta a emergencias de cualquier nueva actividad en su zona. De esa forma están al corriente de la nueva instalación y pueden evaluar el equipo y los servicios proporcionados. El Estado Miembro podrá considerar la posibilidad de proporcionar financiación adicional a las organizaciones locales de respuesta a emergencias a fin de atender las necesidades adicionales que puedan surgir. El examen de los planes de contingencia y emergencia es una parte fundamental de la planificación del trabajo con fuentes selladas que implica el manejo de las fuentes.

5.10. SEGURIDAD FÍSICA DE LAS FUENTES RADIATIVAS

Por seguridad física se entiende las medidas encaminadas a prevenir el acceso no autorizado o el daño a fuentes radiactivas, y la pérdida, robo o traslado no autorizado de esas fuentes [14]. La seguridad física de la fuente es esencial y un elemento importante para garantizar la seguridad tecnológica de la fuente. Sin embargo, una fuente radiactiva puede ser protegida, es decir, estar sometida a control y protegida físicamente, pero eso no significa necesariamente que la fuente también sea segura y no dañe a las personas.

Las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* N° 14, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre materiales radiactivos e instalaciones conexas* [40], y N° 11, *Guía de aplicación sobre la seguridad física de las fuentes radiactivas* [25], así como las NBS [11], han establecido los requisitos de seguridad física de las fuentes radiactivas que complementan los amplios requisitos de seguridad radiológica aplicados a cualquier fuente. En las NBS se exigen, entre otras cosas, que las fuentes radiactivas se mantengan en condiciones de seguridad física para evitar robos o daños, asegurando que no se pierda el control de la fuente, que no se transfiera una fuente a menos que el receptor posea una autorización válida y que se realice un inventario periódico de las fuentes móviles a intervalos apropiados para confirmar que se encuentran en sus lugares autorizados y son seguras.

En respuesta a la amenaza mundial, el OIEA renovó recientemente su estrategia y amplió sus actividades relacionadas con la seguridad de las fuentes radiactivas. Esa estrategia renovada exige la creación y el fortalecimiento de las infraestructuras nacionales de reglamentación a fin de asegurar que las fuentes radiactivas importantes se localicen, registren, protejan y controlen durante todo el ciclo de vida de la fuente.

Con respecto a la seguridad física de las fuentes radiactivas, se reconoce que existe un equilibrio necesario entre la gestión de las fuentes en condiciones de seguridad tecnológica y física y la contribución a su uso beneficioso. Así pues, el nivel de seguridad física debe ser proporcional al nivel de amenaza y al riesgo asociado a la adquisición no autorizada de la fuente.

Un programa completo destinado a abordar el uso doloso de las fuentes radiactivas debe tener en cuenta una amplia gama de cuestiones, entre ellas, el diseño y la fabricación adecuados de las fuentes, los diversos medios de adquisición de las fuentes, la prevención del uso doloso de cualquier fuente adquirida y la mitigación de los efectos, si las fuentes se utilizan de manera dolosa.

La confidencialidad de la información también reviste gran importancia. Es necesario que cada Estado Miembro adopte medidas apropiadas compatibles con su legislación nacional para proteger el carácter confidencial de toda información que reciba en confianza en virtud del Código de Conducta [14] de otro Estado Miembro o mediante la participación en una actividad realizada para la aplicación del Código de Conducta. Si un Estado Miembro proporciona información a las organizaciones internacionales de manera confidencial, es necesario

adoptar medidas para garantizar la protección de la confidencialidad de esa información. Un Estado Miembro que haya recibido información confidencial de otro Estado Miembro solo debería proporcionar esa información a terceros con el consentimiento de ese Estado Miembro. No se espera que un Estado Miembro facilite información que no esté autorizado a comunicar con arreglo a su legislación nacional o que pueda poner en peligro la seguridad de ese Estado Miembro.

La publicación N° 11 de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA, Seguridad física de las fuentes radiactivas* [25], ofrece orientación para aplicar medidas de seguridad física en relación con las fuentes radiactivas. También proporciona asesoramiento sobre la aplicación de las disposiciones relativas a la seguridad física que figuran en el Código de Conducta [14]. El presente documento incluye orientación y medidas recomendadas para prevenir y detectar actos dolosos relacionados con las fuentes radiactivas y para responder ante estos. También ayudará a prevenir la pérdida de control de esas fuentes.

5.11. CONTROL DE LA CRITICIDAD

Cuando se recogen, embalan y almacenan numerosas fuentes selladas que contienen nucleidos fisionables, los usuarios deberían evaluar las cantidades apropiadas de materiales que se colocan en cada bulto para su almacenamiento o disposición final. Tanto las instalaciones centralizadas de almacenamiento como las instalaciones de disposición final suelen contener límites de cantidad y de embalaje en sus criterios de aceptación. Los usuarios que almacenan fuentes que contengan material fisible en el lugar del usuario pueden obtener asistencia del OIEA para determinar los límites de seguridad de las fuentes disponibles.

5.12. MONITORIZACIÓN RADIOLÓGICA

Deben controlarse las zonas de procesamiento y almacenamiento como zonas radiológicas para reducir al mínimo la exposición de los trabajadores a las radiaciones ionizantes y limitar la propagación de la contaminación radiactiva, si la hubiera. Deben realizarse estudios periódicos de la contaminación y la radiación en la zona de trabajo a fin de establecer que se cumplen los requisitos radiológicos [41, 42]. Además, si se almacenan fuentes selladas que contienen nucleidos de período largo, volátiles o radiotóxicos (por ejemplo, el radio), es necesario vigilar los niveles de actividad en el aire. La detección de contaminación aérea o superficial es un indicio de la presencia de fuentes de fuga. Todas las anomalías deben investigarse y deben tomarse las medidas apropiadas. Según los requisitos locales para los emplazamientos, esas circunstancias se comunicarían al órgano regulador.

Los operadores deberían considerar la combinación apropiada de monitores de zona o monitores portátiles o instalados específicamente para la zona de trabajo, y la dosimetría del personal, incluida la dosimetría electrónica cuando esté disponible. Entre los requisitos particulares de protección radiológica cabe citar los siguientes:

- Se instalará y mantendrá equipo apropiado de monitorización radiológica en la zona de trabajo inmediata.
 - Si se dispone de ellos, deberían utilizarse instrumentos de alarma, en particular si las tareas que han de realizarse pueden dar lugar a cambios rápidos en las condiciones radiológicas;
 - los dosímetros del personal deberían llevarse según las instrucciones.
- En cada punto de una operación en que se elimine o abra una barrera a la dispersión de la contaminación, deberían evaluarse los niveles de contaminación.
 - Los niveles de contaminación permitidos deberían establecerse y ser claros para cada etapa del trabajo planificado;
 - la respuesta a los niveles de contaminación que excedan los niveles permitidos debería llevarse a cabo en su totalidad inmediatamente y el trabajo debería detenerse o interrumpirse según lo definido en los controles de trabajo.

5.13. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS

Hay algunas cuestiones que pueden dar lugar a problemas potenciales en la gestión segura de las fuentes DSRS.

5.13.1. Particularidades del sistema de reglamentación

El sistema de control reglamentario es fundamental para la seguridad tecnológica y la seguridad física de las fuentes radiactivas. Toda evaluación de la seguridad tecnológica y la seguridad física de las fuentes radiactivas en un país debe comenzar con un examen del nivel actual y anterior del control reglamentario de esos materiales. Muchos países han utilizado fuentes radiactivas antes del desarrollo de sus actuales infraestructuras de reglamentación. Por otro lado, las infraestructuras se modifican ocasionalmente, y se revisan y adaptan a las nuevas realidades tecnológicas, jurídicas y políticas. Así pues, por lo que respecta a todos los países, su infraestructura de reglamentación está en constante evolución y la probabilidad de que pierdan el control de las fuentes depende no solo de su uso histórico, sino también de la situación de su infraestructura reglamentaria en función del tiempo.

Al determinar y analizar la infraestructura de reglamentación, resulta más útil centrarse en los elementos que influyen directamente en la probabilidad de pérdida de control de las fuentes y, en particular, en las fuentes de las categorías de mayor riesgo [43]. Esos elementos incluirán temas como la concesión de licencias, la importación, la posesión, el uso y la disposición final de fuentes radiactivas. Gran parte de la información estará en los reglamentos; los órganos reguladores u otras organizaciones supervisan específicamente la radiación o los materiales radiactivos. Sin embargo, para obtener otra información de interés, como la verificación de la competencia y la legitimidad de quienes desean poseer y utilizar fuentes, tal vez sea necesario recurrir a otra legislación y otros órganos reguladores o de inteligencia.

Como ejemplo de la importancia del nivel de control reglamentario, considérese un problema habitual en el que un calibrador industrial se transfiere involuntariamente a una planta de reciclado de chatarra [43]. Se trata de un problema cada vez mayor que en el pasado ha causado muertes y lesiones graves, así como la necesidad de una costosa descontaminación. Hay muchas razones por las que el problema existe, pero, básicamente, implica dos deficiencias reguladoras fundamentales:

- 1) la falta de un control reglamentario eficaz mediante la notificación o autorización y la inspección;
- 2) la falta de requisitos reglamentarios o de observancia en materia de seguridad física y responsabilidad de las fuentes.

Este problema particular parece agravarse en los países en que la infraestructura de reglamentación es precaria o, en rigor, inexistente. El OIEA ha determinado cuáles son los problemas habituales relacionados con las fuentes [43], que se enumeran a continuación sin ningún orden en particular:

- ausencia de leyes y reglamentos adecuados que regulen el control de las fuentes radiactivas;
- falta de independencia del órgano regulador;
- falta o insuficiencia de un proceso de autorización, concesión de licencias o registro de fuentes radiactivas;
- falta de autorización o licencia específica para las fuentes radiactivas de propiedad pública;
- falta o insuficiencia de inspección, observancia y seguimiento;
- estructura de tasas para la concesión de licencias que fomenta comportamientos indeseados por los usuarios;
- ausencia de un orden de prioridad para las iniciativas en materia de reglamentación, ya que se dedica la misma cantidad de trabajo a todas las fuentes independientemente de su posible peligro;
- orden de prioridad de las iniciativas según regiones geográficas, regiones políticas o usos, más que según la categorización de las fuentes radiactivas.

Hay grandes diferencias entre la infraestructura de reglamentación de los distintos Estados Miembros. En unos pocos países, todas o la mayoría de las actividades relacionadas con las fuentes selladas son responsabilidad de un solo regulador. En varios países, sin embargo, hay dos o más organismos reguladores que comparten responsabilidades en relación con las diferentes actividades o etapas del ciclo de vida de la fuente.

La complejidad asociada a la existencia de varios reguladores dificulta el control general de las fuentes selladas; es esencial un alto grado de comunicación para que la política de gestión de las fuentes se aplique con

eficacia. Por ejemplo, cuando la aprobación específica de las transferencias, las importaciones, el transporte de fuentes, etc., se obtiene de un regulador que es diferente del responsable de la concesión de licencias, es poco probable que la transferencia de fuentes propuesta pueda cotejarse con la licencia del destinatario. El mismo problema puede existir también en una gran organización reguladora en la que departamentos distintos se encargan de diferentes actividades. El hecho de que se haya adoptado un sistema de concesión de licencias de período fijo en algunos Estados Miembros tiene la ventaja de que sirve de estímulo para que los usuarios reevalúen sus existencias de fuentes, su situación, su sistema de gestión, etc., y garantiza que el regulador disponga de registros actualizados de los usuarios. Sin embargo, el proceso de renovación de las licencias no debe ser innecesariamente largo.

5.13.2. Calidad del registro de fuentes

La existencia y la calidad de un registro nacional de fuentes radiactivas será un indicador principal de la probabilidad de que se produzcan problemas de gestión de las fuentes DSRS en un país. La siguiente información, en principio, puede utilizarse para crear una lista de fuentes [43]:

- los inventarios de fuentes mantenidos por los usuarios (en algunos marcos reguladores);
- los registros de los fabricantes de fuentes;
- los registros de los distribuidores de fuentes;
- los registros de las empresas que prestan servicios relacionados con los dispositivos que incluyen fuentes;
- los registros de las empresas de transporte o envío, incluidas las declaraciones de aduana;
- la información de los informes y notificaciones de sucesos;
- la información contenida en los registros de concesión de licencias a usuarios.

Es probable que la información de la fuente radiactiva reunida de esta manera sea incompleta. Por ejemplo, los registros solo pueden identificar la existencia de un dispositivo, pero no las distintas fuentes o las fuentes dentro del dispositivo. Se pueden utilizar varias fuentes distintas en un solo dispositivo durante la vida útil de este. Otro problema de la información es que no indicará necesariamente la probabilidad de que las fuentes identificadas se hayan dejado de utilizar. En algunos casos, se conceden licencias para la posesión de hasta cierta actividad de un radionucleido determinado y ese mecanismo puede presentar algunos problemas de inventario. El licenciario puede no tener ninguna fuente o tener una o más fuentes diferenciadas hasta esa cantidad. Por todo ello, puede ser necesario un cierto grado de seguimiento.

Incluso si existe un registro nacional, es muy probable que esté incompleto. Si está incompleto, quiere decir que no se han identificado todas las fuentes en desuso y algunas de ellas se han convertido en fuentes huérfanas. Por lo tanto, los inventarios existentes deben examinarse de manera crítica para comprobar su calidad, lógica, coherencia interna y probable integridad.

A continuación se enumeran los problemas habituales detectados en esta esfera:

- solo algunos licenciarios tienen su propio inventario;
- solo hay un inventario local o regional;
- solo se incluyen las fuentes de un ministerio o departamento gubernamental (como el Ministerio de Salud);
- solo se incluyen las fuentes de un tipo concreto, o que utiliza un determinado sector;
- solo se incluyen las fuentes adquiridas o añadidas después de una determinada fecha;
- no se incluyen las fuentes militares;
- faltan datos importantes;
- hay datos evidentemente incorrectos;
- la información está desactualizada.

Se han adoptado diferentes enfoques en distintos países para establecer registros de fuentes. En los países en los que el mercado de fuentes es relativamente pequeño y un solo regulador se encarga de las fuentes selladas, ha sido posible mantener una base de datos precisa que incluye información actualizada sobre todas las fuentes. En los países en que hay un gran número de fuentes se ha utilizado un enfoque regional. A algunos países que

utilizan desde hace mucho tiempo y de forma generalizada las radiaciones ionizantes les resultaría difícil cambiar el sistema establecido por un enfoque centralizado.

Al elaborar un registro nacional, o al evaluar la integridad o la exactitud de un inventario, es necesario dar prioridad a las fuentes de categoría superior. Por ejemplo, debe haber un alto grado de garantía de que todas las fuentes de las categorías 1 y 2 están incluidas en el registro. La comprobación de que las fuentes de las categorías 4 y 5 están en el registro puede gestionarse con una prioridad mucho menor durante un período más prolongado. El otro aspecto relativo a la calidad del inventario se refiere al tipo, la exactitud y la exhaustividad de la información que se registra de cada una de las fuentes radiactivas.

En la mayoría de las circunstancias, el mejor método para generar y mantener un inventario de fuentes radiactivas es utilizar programas de bases de datos, en lugar de programas de hojas de cálculo o de procesamiento de textos, como se ha hecho en ocasiones. Una vez establecida, una base de datos de fuentes permite que la búsqueda, la clasificación y la presentación de informes sean mucho más fáciles. Existen varios programas de inventario de material radiactivo disponibles en el mercado, así como el Sistema de Información para Autoridades Reguladoras del OIEA (RAIS) [44], que tiene un módulo de inventario de fuentes.

5.13.3. Exención

La mayoría de los Estados Miembros aplican algún nivel de exención del control reglamentario, que en general se basa en los límites de actividad de cada uno de los radionucleidos y en función de su radiotoxicidad o de las prácticas justificadas. Algunos países utilizan una combinación de ambos enfoques. Sin embargo, hay una considerable variabilidad en las prácticas reales en lo que respecta a los niveles de exención en los diversos Estados Miembros.

5.13.4. Financiación

Puede que, una vez adquirido y entregado el equipo, una instalación no prevea el costo de la transferencia de propiedad de la fuente cuando algún día el equipo sea retirado. La razón podría ser que los propietarios de la instalación no tengan un mecanismo presupuestario para un costo devengado cuya realización dista mucho en el futuro (decenas de años, tal vez) y cuyo valor solo puede ser estimado. Otra razón podría ser que la instalación suponga que puede cubrir el costo de la transferencia de la propiedad con cargo a su presupuesto operativo o como una condición de compra de equipo nuevo. Ello puede originar una presión financiera cuando se plantee la transferencia de propiedad, con la correspondiente tentación de recurrir a opciones menos caras. Tales alternativas pueden dar lugar a una mayor probabilidad de pérdida de control de la fuente gastada.

Varios Estados Miembros proporcionan financiación pública, conocimientos especializados e instalaciones para la recuperación, el acondicionamiento, el almacenamiento y la disposición final de fuentes en desuso y huérfanas. Esto es especialmente eficaz para las fuentes problemáticas de alto riesgo. Esta práctica puede aplicarse con o sin tasas de usuario.

La adopción de una tasa de licencia anual desalienta el almacenamiento a largo plazo de las fuentes en desuso al introducir una sanción financiera. Este sistema se utiliza en Finlandia.

5.13.5. Gestión de registros

La falta de registros de los primeros años de almacenamiento relativos a la ubicación de las fuentes almacenadas dificulta la recuperación de las fuentes, incluida la estimación de las dosis operacionales, la evaluación de la seguridad y la explicación de los resultados de la vigilancia radiológica.

Si las entidades generadoras de desechos utilizan un sistema de rastreo de la fuente, es beneficioso que ese sistema sea compatible con el sistema de rastreo de desechos de la instalación de almacenamiento. De esa forma se puede reducir la duplicación de esfuerzos o permitir la transferencia de alguna información entre bases de datos. La experiencia ha demostrado que el uso de los métodos de identificación que se emplean habitualmente (por ejemplo, números pintados en el exterior del bidón o etiquetas de papel, aunque estén protegidas con plástico) no es suficiente para garantizar la identificación durante un almacenamiento prolongado. Las etiquetas deben ser más duraderas, por ejemplo, se pueden utilizar etiquetas metálicas fijadas en la matriz de cemento dentro del contenedor. Hay que tener especial cuidado en mantener las copias de seguridad de las bases de datos actualizadas

en lo que respecta al *hardware* y el *software*. La tecnología informática puede cambiar rápidamente con el tiempo. Los retrasos en la actualización de los componentes de *software* y *hardware* pueden poner en peligro la base de datos de fuentes DSRS, haciendo necesarios sistemas redundantes. Se ha perdido mucha información en el pasado debido a la deficiente gestión de los registros. Las entradas que se anotaban en los libros de registro solían ser crípticas o ambiguas. Se han desplegado y se siguen desplegando esfuerzos significativos para “traducir” algunos de los antiguos registros. El mantenimiento de una base de datos de rastreo de fuentes exige un esfuerzo constante.

Es importante verificar los registros. Existen ejemplos en los que los registros no reflejan con exactitud la naturaleza, la ubicación y las cantidades reales de las fuentes. Las bases de datos históricas no tienen suficiente información para posibilitar una gestión rentable de los desechos que se han almacenado durante períodos prolongados. El problema que se está experimentando es que la base de datos actual es operacional y puede que no sea utilizable en el futuro en su estado actual.

No solo es difícil establecer un sistema de registro fiable a largo plazo, sino que a veces falta el incentivo de destinar recursos a la tarea.

5.13.6. Evaluación del sistema de gestión

La idoneidad del sistema de gestión suele verificarse mediante una evaluación. La evaluación incluye actividades de la administración sobre la verificación del producto, la autoevaluación y la verificación independiente. La evaluación se aplica a todos los elementos de la gestión de las fuentes DSRS y puede medir su interfaz y eficacia. Varios años de experiencia han demostrado que cualquier sistema de gestión que se abandone a su suerte se deteriorará con el tiempo. Por consiguiente, la evaluación del sistema de gestión se convierte en la parte más importante del sistema general de gestión porque proporciona una medida para determinar la eficacia del sistema antes, durante y después de la disposición final, y para el mejoramiento continuo de la calidad de todo el proceso.

6. ESTRATEGIA DE GESTIÓN

El Código de Conducta [14] exige lo siguiente:

“Todo Estado debe, a los efectos de proteger a las personas, la sociedad y el medio ambiente, adoptar las medidas apropiadas que sean necesarias para asegurar que las fuentes radiactivas dentro de su territorio, o bajo su jurisdicción o control, se gestionen y protejan en condiciones de seguridad tecnológica y física durante su vida útil y al final de ésta”.

No existe una estrategia única e integral para el final de la vida útil aplicable a todos los Estados. Las estrategias de gestión muestran variaciones en los aspectos siguientes: i) la madurez del sistema legislativo y reglamentario; ii) la existencia de un programa de energía nucleoelectrica; iii) el inventario y las características de las fuentes en desuso del Estado; iv) los recursos humanos y financieros disponibles; y v) si el Estado es suministrador de fuentes radiactivas. Las fuentes en desuso son probablemente el factor más importante con respecto a la gestión de desechos radiactivos en los Estados sin programas nucleoelectricos. Para algunos Estados con industria nuclear, asegurar que se otorga la prioridad suficiente a las fuentes en desuso puede entrañar un desafío. En muchos países, la política de gestión de las DSRS está establecida en la política nacional de gestión de desechos radiactivos. Las cuestiones que hay que abordar en los documentos de políticas se concretan en el artículo 28 de la Convención Conjunta [13] y en otras publicaciones del OIEA [29, 44, 45].

Con independencia de la envergadura de las actividades y el alcance de los riesgos involucrados, todo Estado Miembro debería contar con una estrategia para la aplicación de la política nacional. Esa estrategia debería delinear un enfoque sistemático, en el que se incluyan responsabilidades claramente asignadas, datos pormenorizados del inventario de fuentes en desuso existentes y previstas, secuencias bien definidas de todas las medidas de gestión para cada fuente o categoría de fuentes y disponibilidad de las tecnologías apropiadas. Es preciso que la estrategia se conciba como un plan de gestión que facilita una planificación sistemática y una aplicación segura de todas las actividades de gestión. Una vez aprobado por las autoridades, el plan de gestión sirve de base para la concesión de fondos para la gestión de las fuentes en desuso.

La formulación de esta estrategia podría ser responsabilidad del licenciatarario o de una organización central de gestión de desechos radiactivos. Si el número de fuentes es de poca envergadura y no se cuenta con una organización central de gestión de desechos radiactivos, el órgano regulador, en coordinación con el usuario, puede llegar a una solución adecuada de ámbito nacional para la gestión de las DSRS.

6.1. REQUISITOS PREVIOS PARA LA ELABORACIÓN DE LA ESTRATEGIA

Para formular o actualizar una estrategia nacional o la estrategia de una de las organizaciones implicadas en su aplicación, las personas participantes deberían tener una idea cabal de los temas que se enumeran a continuación, entre otras cuestiones.

- Usos presentes y futuros de las fuentes en el país;
- inventario de las DSRS del país;
- sistema de categorización de las fuentes;
- características de las DSRS;
- estrategias de gestión de las DSRS en otros países;
- conocimiento de las instalaciones existentes para la gestión de las DSRS (celdas calientes, instalaciones de almacenamiento y de disposición final);
- disponibilidad de recursos (fondos, personal, infraestructura);
- régimen de reglamentación en vigor (requisitos de aceptación y devolución de las fuentes en desuso);
- expectativas e intereses de las partes implicadas;
- sistema nacional de clasificación de los desechos radiactivos.

Tal vez haya países que prefieran formular su estrategia en dos niveles: el gobierno preceptúa las materias básicas en términos generales como estrategia nacional y se delega en los propietarios de determinadas fuentes su aplicación detallada (estrategias de las empresas). Este enfoque puede recomendarse para mejorar la coordinación de la gestión de las DSRS, incrementar su seguridad tecnológica y física y explotar los recursos nacionales de manera eficaz. Lo habitual es que se prevea un único almacén o repositorio nacional en lugar de varias instalaciones propiedad de grandes titulares de licencias o que se creen servicios centralizados para la manipulación y el acondicionamiento.

6.2. OPCIONES DE GESTIÓN ESTRATÉGICA

La opción de gestión seleccionada para una fuente determinada dependerá de varios factores pertinentes, entre ellos, la actividad, el contenido en radioisótopos, el período de semidesintegración, las cláusulas del contrato de compraventa y la condición física de la fuente. Tras elegir la opción de gestión, el licenciataria notificará la decisión adoptada al órgano regulador. Es preceptivo que el licenciataria interactúe con el regulador en todas las cuestiones relativas a la gestión de las DSRS.

Para las fuentes radiactivas en desuso, pueden estudiarse las siguientes opciones generales de gestión:

- transferencia a otro usuario autorizado (para su posterior uso autorizado);
- devolución al suministrador o fabricante;
- almacenamiento temporal en su blindaje original (por ejemplo, para radionucleidos con períodos de semidesintegración de menos de 100 días);
- acondicionamiento (por ejemplo, sobreembalaje);
- almacenamiento (por ejemplo, en una instalación de almacenamiento específica o centralizada);
- disposición final.

Deberán caracterizarse todas las fuentes que ingresen en el proceso de gestión de desechos para determinar su actividad, el contenido de radionucleidos y otras características importantes. Todo ello podría servir de base para determinar las opciones concretas para la gestión de las fuentes. En la figura 44 se describen de manera general las opciones de gestión de las DSRS, teniendo en cuenta las posibilidades de reutilización o reciclado de una fuente y varias opciones de disposición final, en función de las características de la fuente, como su período de semidesintegración y condición física.

La clausura se refiere a la retirada de una instalación de fuentes de radiación y dispositivos conexos con licencia y a las medidas administrativas y técnicas adoptadas para eximirla de la aplicabilidad de la totalidad o una parte de los controles reglamentarios [30]. En algunas instalaciones, puede haber un solo dispositivo de radiación instalado, como puede ser una máquina de teleterapia. En otras, puede haber locales provistos de licencias con varios dispositivos instalados (como puede ser una línea de producción con calibradores industriales) o almacenados (como puede darse en un almacén de dispositivos móviles). La clausura puede comportar la retirada de un gran número de fuentes con anterioridad al vencimiento de la licencia de la instalación. La clausura también puede llevar aparejada la retirada de parte del inventario de dispositivos de una instalación antes de la concesión de una licencia nueva y la instalación de dispositivos que los reemplacen para la labor futura. La sustitución de fuentes dentro de un dispositivo ya existente no se considera clausura. Para la planificación y ejecución de una clausura deberían seguirse las orientaciones sobre la gestión segura de las actividades de clausura de instalaciones médicas, industriales y de investigación [46].

En el caso de instalaciones que utilicen fuentes radiactivas selladas, la clausura puede conllevar únicamente la retirada autorizada de todas las fuentes de la instalación. En situaciones más complejas en las que se requiera el desmantelamiento en el emplazamiento de equipos que contengan fuentes, las actividades de clausura deberían confiarse a personal debidamente cualificado y experimentado, en zonas adecuadas para los tipos de procedimientos que vayan a ejecutarse. Muchos de los usuarios de equipos que contienen fuentes no contarán con el personal o con la autorización para el desmantelamiento integral de los equipos que requieran la retirada de fuentes selladas.

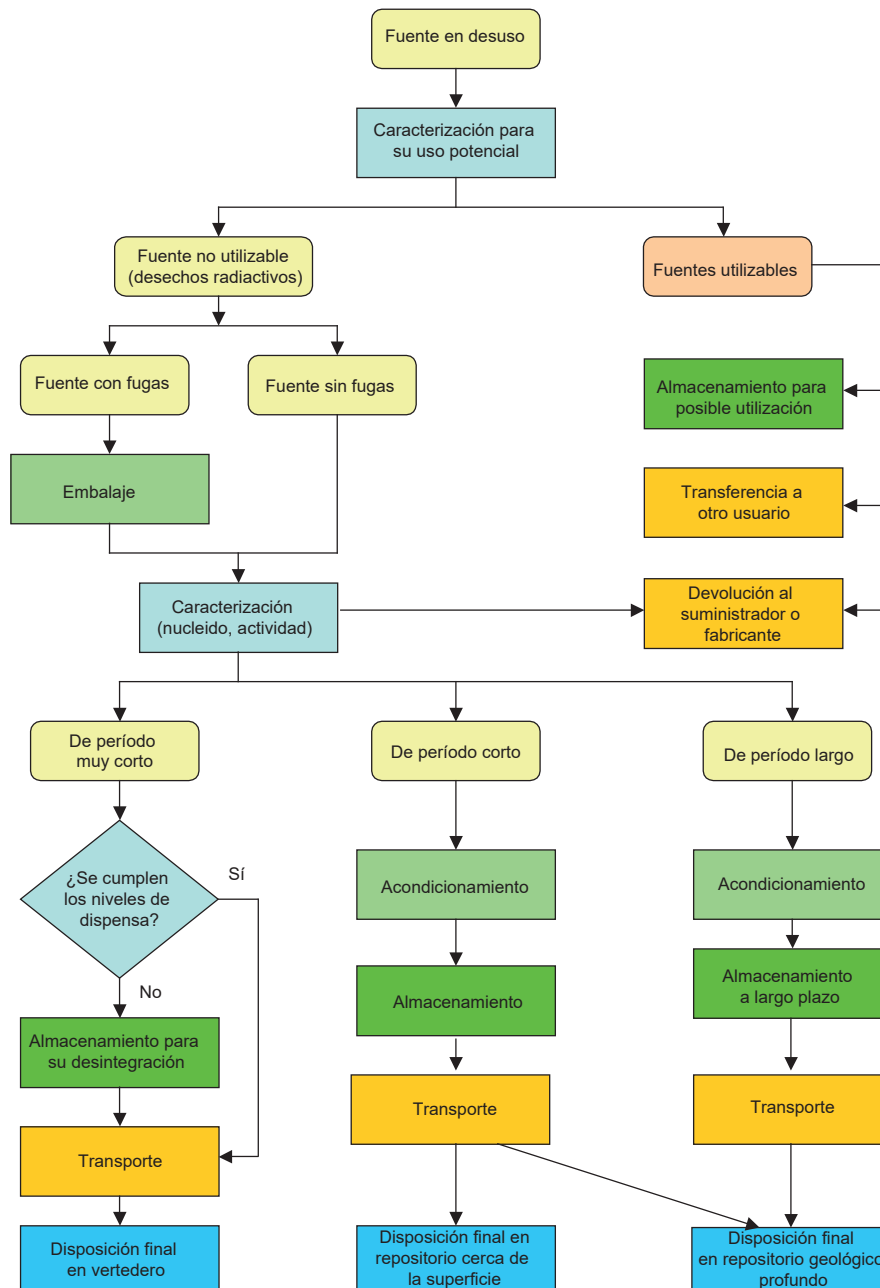


Fig. 44. Diagrama de flujo de la gestión de las DSRS.

6.2.1. Transferencia a otro usuario autorizado

Si la actividad y condición física de una fuente permiten la continuación de su uso, la fuente DSRS puede reutilizarse para otras aplicaciones. La transferencia de las fuentes a otros usuarios ofrece ventajas tanto económicas como ambientales. No obstante, la transferencia debería llevarse a cabo de modo controlado y debería informarse al destinatario de la fuente de los requisitos reglamentarios pertinentes. En el arreglo es preciso garantizar que el emplazamiento del usuario cuenta con la licencia para recibir la fuente, que la instalación del nuevo usuario dispone de la infraestructura requerida para alojar la fuente reutilizada y que el usuario anterior, el nuevo y el órgano regulador nacional se entregan los documentos pertinentes. Si las circunstancias lo permiten, puede estudiarse la reutilización de fuentes selladas antes de su adquisición.

Es necesario prestar una atención especial a asegurar que las fuentes selladas se encuentran en condiciones de servicio y son adecuadas para la nueva aplicación prevista. Deberían facilitarse al nuevo propietario copias de toda

la información pertinente referida al historial de uso de la fuente (como las condiciones de uso y los registros de mantenimiento). Como mínimo, esa información debería comprender el número de serie de la fuente, el contenido de radionucleidos de esta y su actividad. En el caso de fuentes de actividad alta, es probable que las revisiones de mantenimiento solo puedan llevarse a cabo en una instalación especializada. Por tanto, la transferencia directa a otro usuario puede no ser una opción apropiada para esas fuentes; la transferencia debería realizarse por mediación de un fabricante o suministrador de fuentes u otro órgano competente.

La transferencia a otro usuario dentro de las fronteras nacionales resulta especialmente aplicable al ^{137}Cs y el ^{60}Co empleados en tratamientos clínicos. Una fuente puede reutilizarse en su soporte original sin desmantelar ninguna cápsula. Las fuentes selladas que se faciliten a otros usuarios se embalan y transportan preferentemente en su contenedor de transporte original. En su ausencia, es preciso tomar medidas para adquirir un contenedor apropiado o para contratar una organización especializada en el transporte de materiales nucleares.

6.2.2. Devolución al suministrador o fabricante

Cuando una DSRS no puede reutilizarse, esta puede devolverse al suministrador o fabricante original o a otro alternativo. Dado que los fabricantes o suministradores son conocedores de la economía del reciclado y de la demanda de fuentes de distinto tipo, se encuentran en una posición ideal para tomar las decisiones apropiadas respecto de la disposición final de las fuentes. Los procedimientos de devolución pueden incluir los pactos jurídicos siguientes:

- el usuario de una fuente radiactiva sellada incluye una cláusula en el contrato de compraventa o arrendamiento que permite o exige la devolución de la fuente. En muchos países, ya es una práctica habitual;
- antes de importar una fuente, se entrega al órgano regulador un ejemplar del contrato, en el que consta la cláusula de devolución.

En cualquier momento durante la vida útil de la fuente, si no se había hecho en el momento de la adquisición, puede acordarse con el suministrador o fabricante la devolución de la fuente. Es necesario embalar y transportar las fuentes que se devuelvan a los suministradores o fabricantes de conformidad con los reglamentos de transporte aplicables [47]. En ocasiones, la devolución no es posible, en especial en casos de fuentes más antiguas cuyo suministrador no se conoce o no se encuentra ya en activo.

La devolución al suministrador o fabricante original suele ser la opción preferida para las fuentes de las categorías 1 y 2; no obstante, deberá intentarse devolver todas las DSRS al suministrador o fabricante que disponen de todos los equipos necesarios para su reutilización o reciclado.

El reencapsulamiento y reciclado de las DSRS de actividad relativamente alta se lleva a cabo en celdas calientes. El reencapsulamiento suele llevarse a cabo para las fuentes de neutrones de ^{60}Co , ^{137}Cs y Am-Be. La materia prima retirada de las cápsulas puede emplearse para producir fuentes nuevas con otros propósitos. Por ejemplo, las fuentes de ^{137}Cs en forma de cloruro de cesio presentes en las unidades antiguas de teleterapia pueden recuperarse y transformarse en fuentes pequeñas para otras aplicaciones, como la braquiterapia.

El reciclado también es un enfoque aplicado para fuentes de neutrones, como las de ^{252}Cf . Las fuentes que contienen menos de 40 mg de ^{252}Cf pueden aceptarse con fines de disposición final por un costo bajo, mientras que las que contienen una actividad más alta pueden reciclarse y utilizarse para la fabricación de fuentes nuevas.

La reirradiación no es una opción habitual para la mayoría de isótopos. Una excepción destacada es el ^{75}Se , que se obtiene por irradiación o bien de Se natural o de ^{74}Se altamente enriquecido. El ^{74}Se altamente enriquecido es una materia prima muy cara. Las fuentes gastadas de ^{75}Se pueden irradiarse reiteradamente para obtener nuevas fuentes con el mismo rendimiento que antes.

Como alternativa a la adquisición, el arrendamiento de fuentes se está convirtiendo en una opción cada vez más común. En ese tipo de modalidad, el usuario nunca es propietario de las fuentes, sino que las arrienda al suministrador durante un período de tiempo determinado, tras el cual la fuente se devuelve al suministrador o fabricante. En algunos aspectos, el arrendamiento mejora la seguridad de las fuentes, puesto que el fabricante conserva la titularidad y, con ella, la responsabilidad de recuperarla para su disposición final. No obstante, la responsabilidad continuada de la seguridad diaria sigue siendo de la parte principal. El arrendamiento de fuentes puede ser una opción disponible para períodos breves o fuentes de actividad baja o con períodos de semidesintegración cortos.

6.2.3. Almacenamiento previo a la disposición final

Las fuentes pueden almacenarse antes de su disposición final por la razón específica de permitir la desintegración radiactiva de radionucleidos de período corto (*almacenamiento a corto plazo*), lo que simplifica las gestiones para la disposición final, o también pueden almacenarse mientras se prepara la disposición final. No obstante, no se recomienda el almacenamiento prolongado de las fuentes en desuso por razones distintas a la desintegración radiactiva. La decisión sobre la mejor manera de gestionar el período de almacenamiento hasta el momento de la clausura definitiva y la disposición final debería tomarla la parte principal, con la aprobación del órgano regulador, teniendo en cuenta las circunstancias específicas de la instalación. Por ejemplo, si la instalación contiene un gran número de fuentes en una línea de producción en desuso, debería estudiarse la opción de reunir esas fuentes en un lugar seguro. Esta medida puede tomarse en cualquier caso si no puede garantizarse el control de las fuentes dentro de los locales en desuso.

Las DSRS con períodos de semidesintegración cortos (p. ej., ^{32}P , ^{125}I , ^{192}Ir , ^{210}Po) pueden almacenarse durante un tiempo, hasta que la desintegración radiactiva llegue a niveles aceptables de dispensa que las liberen del control reglamentario. La disposición final de fuentes en desuso desintegradas como materiales no radiactivos en instalaciones de desechos de ámbito municipal, o en otros vertederos de desechos no radiactivos, no se llevará a cabo sin confirmar que la actividad residual que se liberará al medio ambiente cumple con los niveles de dispensa previstos por el órgano regulador.

Al determinar los niveles de dispensa, o al dispensar caso por caso las fuentes en desuso de un mayor control reglamentario, el órgano regulador necesita tener en cuenta los niveles de exención previstos en la legislación nacional sobre protección radiológica. Tal como se recomienda en las NBS [11], el nivel de dispensa de un nucleido determinado no debería ser mayor que su nivel de exención. En el caso de los radionucleidos, para los que resulta adecuada la opción de almacenamiento para la desintegración radiactiva, en las NBS se ofrecen algunos ejemplos y recomiendan sus niveles de exención.

Solo las fuentes que cumplan con los requisitos especificados para el almacenamiento pueden aceptarse a tal fin, ya sea en el emplazamiento o en una instalación de almacenamiento centralizada (véase la sección 9). Para cumplir con estos requisitos, la fuente debería someterse a un acondicionamiento que permita almacenarla en condiciones de seguridad tecnológica y física. El acondicionamiento de una fuente para su almacenamiento debería tener en cuenta la posibilidad de recuperar la fuente para poder reciclarla o reutilizarla posteriormente o para reembalarla para su disposición final (véanse las secciones 10 y 12). Por ejemplo, acondicionarla envolviéndola en hormigón puede resultar contraproducente para su recuperación y posterior reciclado y reutilización o para reembalarla para su disposición final futura.

La mayoría de los países carece de instalaciones de disposición final adecuadas para las DSRS. Puede haber largas demoras antes de que se pueda construir una instalación de disposición final. Por tanto, se requieren instalaciones para el *almacenamiento a largo plazo*. Estas instalaciones podrían dirigirse desde el ámbito nacional, o regional, y necesitar la supervisión reglamentaria apropiada.

6.2.4. Disposición final

Si no existe la opción de reciclado o reutilización o devolución al suministrador o fabricante y se cuenta con un repositorio adecuado, es preciso que el usuario considere la disposición final de la fuente como desecho radiactivo de acuerdo con los requisitos que sean aplicables. La disposición final es la última fase del ciclo de vida de las fuentes radiactivas.

Las opciones de disposición final para las DSRS varían en función de los niveles de actividad y de los tipos de radionucleidos que contienen las fuentes [48]. Los repositorios cerca de la superficie pueden ser adecuados para fuentes de actividad baja y período corto. No obstante, las características radiológicas específicas de muchas DSRS no se ajustan a los requisitos de aceptación de desechos previstos para esas instalaciones. El problema a ese respecto es que forman concentraciones elevadas y localizadas, o puntos activos, en la instalación y que pueden dar lugar a dosis de radiación inaceptables en caso de intromisión humana involuntaria. Para las fuentes en desuso de período largo con niveles de actividad que exceden los criterios aceptados para su disposición final en repositorios cerca de la superficie, la opción preferible es su disposición final subterránea profunda. La disposición final geológica profunda ofrece el nivel más alto de aislamiento disponible entre los conceptos de disposición final que se están examinando en la actualidad. Para los países que no tienen perspectivas de contar con esos repositorios, sería

interesante la posible construcción en el futuro de repositorios geológicos multinacionales. Otra posibilidad es la construcción en territorio nacional de un tipo especial de instalación para la disposición final en pozos barrenados destinada específicamente a la disposición final de las DSRS [48].

Antes de aplicar cualquier opción de disposición final, debe analizarse su seguridad y obtenerse una licencia al efecto.

6.3. TIPO DE INSTALACIÓN

Además de las opciones generales de gestión descritas anteriormente, los países pueden considerar algunos enfoques técnicos para la gestión de sus DSRS. Entre ellos, se encuentra el uso compartido de las instalaciones, su centralización o el uso de instalaciones móviles de procesamiento.

6.3.1. Instalaciones compartidas

Los países pueden considerar compartir con otros las instalaciones para la gestión de los desechos radiactivos. Este enfoque tiene la ventaja de reducir los costos de la gestión de las DSRS para todos los países participantes.

Las instalaciones compartidas pueden incluir instalaciones multilaterales de almacenamiento y disposición final. En el marco de la Convención Conjunta [13] se han formulado propuestas de ese tipo y se han mantenido conversaciones entre países interesados [49].

6.3.2. Instalaciones centralizadas

Escoger entre instalaciones de gestión de las DSRS centralizadas o específicas de los emplazamientos es una opción estratégica. Ambos enfoques tienen ventajas. Una instalación centralizada que pueda procesar, almacenar y, posiblemente, ejecutar la disposición final de la totalidad o gran parte de las DSRS de un país suele ser más económica que una estrategia por emplazamientos, además de requerir menos personal que varios emplazamientos distintos y ser potencialmente más segura. Por otra parte, gestionar la fuente en el propio emplazamiento en el que quedó en desuso tiene la ventaja de reducir la necesidad de transporte de fuentes.

De hecho, la elección rara vez se hace por motivos puramente económicos porque suelen existir factores políticos locales, aspectos históricos del desarrollo nuclear del país, factores geográficos y aspectos de opinión pública que contemplar. No obstante, tanto en la elaboración como en la actualización de las estrategias, estas alternativas deberían estudiarse atentamente antes de escoger una opción para la totalidad o parte de las actividades de gestión de desechos del país.

6.3.3. Instalaciones móviles

Una posible alternativa parcial a la centralización de las instalaciones de gestión de las DSRS, con muchas de sus ventajas económicas, es el empleo de instalaciones móviles de procesamiento. Esas instalaciones funcionan “por lotes” porque suele requerirse una cierta cantidad mínima de fuentes para que su funcionamiento sea eficiente. Los costos de gestión de las DSRS para los distintos usuarios pueden reducirse al compartir esos sistemas de procesamiento. Un ejemplo de instalación móvil empleada en el acondicionamiento de fuentes de actividad alta es la instalación de celda caliente móvil del OIEA (véase la sección 10.7).

6.4. FORMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN

Las estrategias para la gestión de las DSRS deberían abordar la situación específica del Estado Miembro y ser compatibles con ella. Una estrategia nacional para la gestión de las DSRS puede articularse en tres fases [50]:

- 1) *Evaluación*: Decidir el alcance de la estrategia.
- 2) *Formulación*: Definir y priorizar las medidas para lograr soluciones y elaborar el plan en consonancia con ellas.

- 3) *Aplicación*: Obtener el compromiso y los recursos necesarios, aplicar las soluciones y, finalmente, evaluar la repercusión del plan.

Al formular la estrategia general, el Estado Miembro tendrá que evaluar las ventajas e inconvenientes de las distintas opciones y valorarlas en función de sus prioridades. En términos generales, el eje central de una estrategia nacional puede basarse en los siguientes factores:

- categorías de las fuentes (p. ej., categorías 1, 2 y 3);
- tipos de fuentes (p. ej., fuentes de radiografía industrial);
- sector industrial en el que se hayan observado los problemas (p. ej., reciclado de chatarra);
- región o zona geográfica (p. ej., la capital);
- fuentes utilizadas antes de que se crease el órgano regulador nacional.

Una valoración realista de los recursos tanto para la formulación como para la aplicación de la estrategia nacional resulta crítica con miras a que la iniciativa se desarrolle satisfactoriamente. Algunos países quizá puedan desplegar un esfuerzo importante en la formulación de una estrategia nacional integral que se adelante a las condiciones futuras y establezca las medidas apropiadas para esas condiciones.

La fase de evaluación en el establecimiento de una estrategia nacional para la gestión de las DSRS conlleva la recopilación de información y su valoración para alcanzar conclusiones respecto de la naturaleza y magnitud del problema. La fase de evaluación será un proceso continuo y permanente que seguirá la evolución de la situación del Estado Miembro. No se pretende que esta fase sea el único momento de toma de decisiones, sino el momento en que se adoptan las decisiones más importantes sobre la necesidad, la dirección y el contenido de la estrategia nacional.

La valoración de la información se realizará tanto durante como después de la recopilación de información. La cantidad y el tipo de información que se obtenga podrían determinar la necesidad de modificar el alcance y la metodología de la evaluación. Tras obtener la información apropiada, pueden compararse las condiciones reales con las leyes y los reglamentos nacionales pertinentes, así como con las normas y orientaciones internacionales [28, 51], con el fin de determinar la existencia y el alcance de las discrepancias en lo referente a la estrategia nacional de gestión de desechos. El Código de Conducta [14] resulta útil como documento de orientación internacional en la materia.

6.5. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS

6.5.1. Cuestiones generales

Es probable que el país en el que se utilizó una fuente haya obtenido el máximo beneficio práctico y comercial de su explotación y puede argüirse que debería asumir la responsabilidad de su disposición final si existe o se prevé crear una vía adecuada para ello. Sin embargo, es necesario estudiar debidamente los beneficios económicos de consolidar en una sola instalación un gran número de fuentes de tipo similar para su reciclado o disposición final. Esa instalación puede ubicarse en el país de fabricación, pero no necesariamente.

A veces, los controles reglamentarios existentes (inspecciones, acciones coercitivas, etc.) son ineficaces. En esos casos, es necesario establecer un sistema de inspección para hacer cumplir las disposiciones introducidas con arreglo a los reglamentos pertinentes. Los reglamentos deberían facultar a las autoridades a aplicar sanciones por el incumplimiento de las disposiciones reglamentarias. Esas sanciones pueden ser multas proporcionales o la suspensión o retirada de las licencias. También deberían aplicarse las disposiciones generales del Código Penal.

6.5.2. Transferencia a otro usuario autorizado

La experiencia adquirida en la resolución de accidentes reales con fuentes en desuso pone de manifiesto que el riesgo de accidentes se incrementa cuando las fuentes se transfieren físicamente a otro usuario sin la información ni la responsabilidad asociadas.

Cuando se produce un intercambio de responsabilidad, ya sea dentro de la misma institución (del antiguo explotador a la persona encargada del almacenamiento temporal) o de una institución (titular antiguo) a otra (nuevo propietario), las lagunas de información entre los dos usuarios o instituciones son una fuente potencial de nuevos riesgos.

6.5.3. Devolución al suministrador o fabricante

En muchos Estados Miembros, la devolución de la fuente al suministrador o fabricante es la opción recomendada o requerida por la reglamentación nacional. No obstante, en determinados casos, esta opción sería difícil de aplicar por las razones siguientes:

- se desconoce el suministrador original o este ya no existe o resulta ilocalizable;
- han caducado los certificados de la fuente o los certificados especiales;
- no se dispone de un contenedor de transporte apropiado;
- faltan medios de transporte adecuados;
- no se dispone de los fondos necesarios para el embalaje y transporte de las DSRS;
- el sistema de reglamentación impone restricciones a la importación y la exportación.

Estos obstáculos contribuyen a crear cierto grado de confusión en las partes implicadas, en especial si consideramos las restricciones y las dificultades que entraña el transporte transfronterizo de las DSRS. Dadas las restricciones a la transferencia de desechos radiactivos entre países, se han dado casos especiales en varias ocasiones (por ambas partes, esto es, remitente y destinatario) en que el usuario ha transferido fuentes en desuso a una parte que las acepta para reutilizarlas, cuando menos, en parte. En estos casos, parece ser una práctica común que el destinatario acepte el envío (con distintas fuentes) y declare como desecho las fuentes no necesarias poco después de recibirlo. No obstante, cuestiones relativas a la seguridad física de las DSRS han llevado a devolver esas fuentes a los suministradores. La cuestión clave para encontrar una solución podría ser que los fabricantes y reguladores considerasen la vida útil recomendada como un instrumento importante en el proceso de toma de decisiones sobre el estado de una fuente en desuso. Esta esfera podría mejorar con la adopción de una política común, que debería tener en cuenta los factores que se enumeran más adelante.

6.5.4. Almacenamiento previo a la disposición final

Hay pruebas de que, en los Estados Miembros, existen grandes cantidades de fuentes en desuso almacenadas en locales de usuarios. La realidad es que algunas fuentes son propiedad de clínicas privadas, por lo que la propiedad es una cuestión importante al declarar las fuentes como desechos radiactivos. La mayor parte del almacenamiento de fuentes en los locales de los usuarios se debe a razones principalmente económicas. Esas fuentes pueden pasar varios decenios almacenadas en contenedores, algunos de los cuales pueden encontrarse en malas condiciones. En algunos casos, el alto costo asociado a la disposición final, o la falta de opciones adecuadas para ella, pueden ser factores disuasorios para la disposición final segura de las fuentes, lo que lleva a su almacenamiento, a menudo durante períodos indefinidos. Dado que las fuentes se encuentran almacenadas y no están en uso, la obligación de rendir cuentas por ellas puede perderse con el tiempo, o puede producirse una retirada no autorizada o robo.

Según se establece en el Código de Conducta [14], todo Estado debería asegurarse de que las fuentes selladas no permanezcan almacenadas por períodos prolongados en instalaciones que no sean aptas para ese fin. El almacenamiento central de las fuentes en desuso reduce la posibilidad de pérdida, en especial cuando se aplica un control reglamentario genérico. Si bien muchos Estados Miembros tienen en funcionamiento almacenes provisionales que pueden recibir la mayoría de las fuentes, en algunos casos existen límites a los tipos de fuentes que pueden manipularse y almacenarse con facilidad. En varios casos, la capacidad de almacenamiento se torna problemática tras unos años.

Los factores técnicos y de otra índole que afectan a la elección de las tecnologías de acondicionamiento de desechos se analizan en la referencia [52]. Estos factores son parcialmente aplicables a las DSRS si la fuente tiene la consideración de desecho radiactivo y deben tenerse en cuenta al elaborar una estrategia de gestión de desechos.

6.5.5. Disposición final

Aunque varios Estados Miembros han creado o tienen previsto crear instalaciones de disposición final de desechos radiactivos, no todos están en esa situación y, en algunos casos, el número reducido de fuentes y demás desechos radiactivos podría no justificar la construcción de una instalación de disposición final, sobre todo para fuentes de actividad alta o de período largo.

No debería exigirse que los países pequeños sin infraestructura nuclear diseñaran una vía para la disposición final de las fuentes, y se les debería permitir utilizar las vías de otros Estados Miembros. Lo ideal sería que recurriesen al país de fabricación, pero, si existe una alternativa práctica, no tiene por qué ser así.

7. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES EN DESUSO

En la referencia [1], el OIEA define la caracterización como la “determinación de las propiedades físicas, químicas y radiológicas de los desechos con objeto de determinar la necesidad de ajustes, tratamiento o acondicionamiento adicionales, o su adecuación para la manipulación, el procesamiento o el almacenamiento posteriores, o para la disposición final”. Conocer las cantidades y las características de las fuentes en desuso resulta esencial a la hora de elegir una opción de gestión y para demostrar la seguridad de los métodos de gestión.

7.1. INFORMACIÓN REQUERIDA

Toda fuente en desuso debe caracterizarse antes de adoptar ningún paso en su gestión. Como mínimo, se necesita la información siguiente:

- identificación del nucleido;
- estimación de la actividad;
- propiedades físicas de la fuente o dispositivo, incluidos el peso y las dimensiones;
- forma química;
- tipo de blindaje;
- condición de la fuente (p. ej., dañada, con fugas, modificada).

Se considera que la obtención de estos datos es un requisito mínimo absoluto para la manipulación, el acondicionamiento, el transporte, el almacenamiento y la disposición final de las DSRS. Además de los datos mencionados, con miras a formular una estrategia de gestión para una fuente determinada resulta útil la información siguiente:

- método de sellado del material radiactivo;
- números de la fuente y el dispositivo;
- fecha de fabricación;
- nombre del fabricante y país de origen (de la fuente y del dispositivo);
- último usuario o propietario;
- ubicación actual;
- toda información que pueda ayudar a caracterizar la fuente.

7.2. GRUPOS DE CARACTERIZACIÓN DE FUENTES EN DESUSO

Puede ser necesaria una caracterización preliminar de las fuentes para poderlas segregar en tipos manejables. Por ejemplo, la segregación de las fuentes radiactivas selladas de otros desechos, la segregación de fuentes de actividad baja y las que contengan radionucleidos de período corto y la retirada de fuentes radiactivas selladas de su matriz de encapsulamiento de cemento. Las fuentes con fugas deben segregarse del resto y recogerse por separado para evitar la contaminación cruzada. Tal vez sea posible llevar a cabo una segregación inicial de los desechos atendiendo al historial de la instalación, los datos registrados sobre desechos y las mediciones disponibles. Así, según la exhaustividad y solidez de los datos disponibles, podría aplicarse un programa simplificado de caracterización para la verificación y validación.

Desde el punto de vista de la caracterización, las DSRS quedan comprendidas en los grupos siguientes:

- a) *Fuentes controladas (documentadas)*: El uso “controlado” de un dispositivo radiactivo, fuente o embalaje para el transporte puede definirse como el que se utiliza con los fines previstos y que tiene un propietario identificable. Si no se cumplen esos requisitos, el dispositivo, la fuente o el embalaje para el transporte pueden considerarse “no controlados”. Las fuentes controladas tienen la documentación apropiada que ofrece

objetivamente la información sobre las características de la fuente. Esa documentación, por lo general, podría incluir lo siguiente:

- documentación del fabricante (certificado);
- marcado permanente de la fuente, o el equipo o calibrador;
- certificado de rastreabilidad;
- datos de análisis no destructivos;
- documentación de inventario.

Toda esta documentación puede emplearse siempre que las fuentes puedan rastrearse con la documentación correspondiente y que sus actividades se hayan verificado. Es preciso verificar las actividades para la documentación de la rastreabilidad del inventario.

- b) *Fuentes no controladas (no documentadas)*: Fuentes que carecen de la documentación apropiada relativa a sus características. La identificación de los isótopos y la determinación de las actividades conexas de este grupo exigirá mayores esfuerzos. En la mayoría de los casos, las fuentes huérfanas pertenecen al grupo de las fuentes no documentadas, esto es, habrá que aplicar medidas similares para caracterizar las fuentes huérfanas. Además del proceso de caracterización, es importante encontrar al propietario anterior de la fuente. Puede ser útil rastrear la ruta de la fuente huérfana desde su último propietario (el anterior) hasta que se dio la condición de pérdida, y justificar si solo se perdió una fuente o si se requiere la búsqueda y seguimiento de otras.
- c) *Fuentes con fugas*: Fuentes en las que la barrera de confinamiento ya no evita la dispersión de material radiactivo. Este grupo de fuentes selladas puede incluir fuentes con fugas que dispongan de la documentación apropiada (controladas) y también las que carecen de ella (no controladas). Las fuentes con fugas se categorizan por separado porque puede ser necesario someterlas a encapsulamiento o a otras opciones de acondicionamiento.

7.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES

El mejor método de identificación es el número de serie, si existe y es legible. La inspección visual es una técnica muy útil para determinar una serie de parámetros que contribuirán a la caracterización de las fuentes radiactivas selladas [53]. Estos parámetros incluyen la información sobre la condición física de la fuente, sus dimensiones y su blindaje o cubierta protectora.

Para las inspecciones visuales pueden emplearse espejos, lupas, binoculares, videocámaras con control remoto y otros instrumentos, y su uso se recomienda encarecidamente para obtener una información inicial siempre que se cumpla el principio ALARA (tan bajo como sea razonablemente posible). Los endoscopios pueden utilizarse para la inspección visual remota de fuentes y contenedores. Por ejemplo, podrían usarse para la detección del marcado o etiquetado de las fuentes radiactivas selladas, o de evidencias de corrosión y humedad dentro del sistema de contención de los desechos.

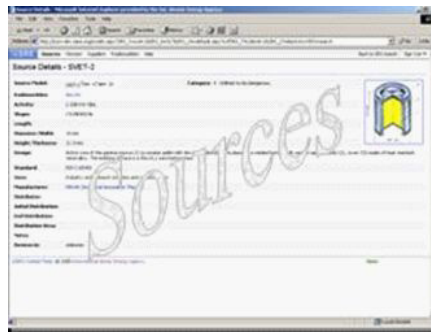
La identificación de fuentes se ve facilitada con el reconocimiento del blindaje y los equipos conexos. En muchos casos, los dispositivos y los embalajes para el transporte también se etiquetan. En función del blindaje del embalaje, las etiquetas de categoría no indican la cantidad de materiales radiactivos, el tipo de radiación o el peligro del material. No obstante, en la etiqueta deberá figurar el nucleido, el número de masa y la actividad. Las “categorías” a las que se hace referencia en el contexto del etiquetado del embalaje no deben confundirse con el sistema de categorización del OIEA, que clasifica las fuentes radiactivas en función de su nivel de peligro. Las formas y tamaños de las fuentes varían considerablemente según sus propósitos; no obstante, el diseño específico de los dispositivos o de las cubiertas protectoras que contienen fuentes radiactivas puede ayudar al reconocimiento visual de las fuentes. Los datos recopilados en el pasado sobre el encapsulamiento y las estructuras protectoras habituales de las fuentes radiactivas selladas pueden dar información sobre los radionucleidos que puedan estar presentes y su contenido de actividad aproximado.

El OIEA ha elaborado un sistema integral de datos sobre las fuentes radiactivas selladas. El sistema incluye datos sobre las fuentes radiactivas selladas en sí y también sobre los dispositivos que las albergan. Tiene la forma de una base de datos electrónica y se conoce como Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados [54].

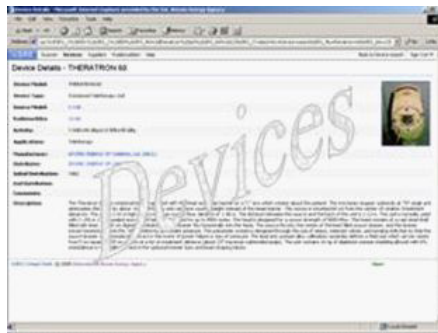
Este catálogo proporciona información vital sobre varios individuos y organizaciones relacionados con las fuentes y los dispositivos radiactivos fabricados industrialmente, que se denominan “modelos de fuentes” y “modelos de dispositivos”. Facilita la identificación de las fuentes, sobre la base de la limitada información disponible (o “encontrada”) para determinadas fuentes o dispositivos radiactivos, con lo que es un apoyo para la manipulación segura de las fuentes.

El catálogo utiliza una gran cantidad de datos para ofrecer información sobre una fuente o dispositivo desconocido en concreto para el que se dispone de datos muy fragmentarios. La información se gestiona a través de tres bases de datos principales vinculadas entre sí.

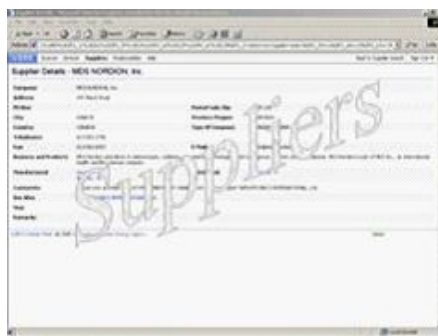
- Modelos de fuentes. Esta base de datos contiene los datos de los modelos de fuentes (esto es, radionucleidos, actividad, categoría, forma, tamaño, detalles de fabricación, usos, fabricante o distribuidor, etc.). En este momento, el catálogo contiene 6800 modelos de fuentes.



- Modelos de dispositivos. Esta base de datos contiene datos sobre los modelos de dispositivos, incluidos los contenedores de transporte (esto es, descripción, aplicaciones, fabricante o distribuidor e identificación de las fuentes selladas autorizadas que contiene el dispositivo). En la actualidad, el catálogo contiene 8000 modelos de dispositivos.



- Suministradores. Esta base de datos contiene las direcciones de los fabricantes o distribuidores de las fuentes radiactivas selladas y de los dispositivos que las albergan. En este momento, el catálogo contiene información sobre 1200 fabricantes o distribuidores.



Las opciones del catálogo incluyen un sistema de identificación (navegador) en el que se rellena un formulario que se muestra en pantalla. Una vez cumplimentado el formulario, el catálogo ofrece la identidad de la fuente o el dispositivo más probable.

El grupo destinatario de usuarios del catálogo es amplio e incluye a reguladores, profesionales que trabajen con fuentes huérfanas, fabricantes, distribuidores, equipos de respuesta a emergencias, usuarios de fuentes y dispositivos, organizaciones encargadas de velar por el cumplimiento de la ley, autoridades aduaneras, depósitos de chatarra y plantas de producción de metales y empresas y organizaciones de gestión de desechos.

Para que el catálogo sea un instrumento útil para los Estados Miembros, el OIEA tiene previsto mantenerlo y actualizarlo periódicamente, con un énfasis especial en la garantía y el control de la calidad y en las pruebas de los dispositivos cuando se incorporen.

7.4. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES NO DOCUMENTADAS

Cuando la información antes mencionada no está disponible, debería obtenerse mediante métodos de caracterización diferentes. Se recomienda la implantación de un sistema de caracterización que se ejecute de acuerdo con un sistema de gestión adecuado. El sistema de gestión debería ofrecer la confianza de que se cumplen los requisitos medioambientales, técnicos y de seguridad.

7.4.1. Requisitos del sistema de caracterización

Antes de crear un sistema de caracterización de las fuentes radiactivas selladas, hay que ofrecer una especificación que determine los requisitos del sistema [55, 56]. Puede tratarse de una especificación detallada de un componente determinado de un equipo, si el explotador está seguro de que ese equipo es necesario. De manera alternativa, puede proporcionarse una especificación funcional que describa el problema (incluidas las tareas que se ejecutarán y los productos requeridos) y posibilite que el suministrador utilice su criterio profesional para elegir el sistema. De esa forma el suministrador podría, por ejemplo, proponer sistemas integrados o únicos, en función del problema.

Es preciso abordar las cuestiones siguientes:

- a) los detalles de las DSRS, con inclusión de su historial, antigüedad, radionucleidos previstos y forma física de las fuentes radiactivas selladas, matriz de desechos con inclusión de los materiales (p. ej. absorbentes de neutrones), que pueden interferir con las técnicas de medición, dimensiones del embalaje;
- b) los detalles del proceso general, incluida una descripción de la instalación que contendrá los sistemas de caracterización, el entorno de trabajo del equipo, las limitaciones de las dimensiones del equipo, los requisitos de caudal, los tiempos máximos disponibles para las mediciones;
- c) los detalles del equipo de interfaz (p. ej., si el nuevo equipo de caracterización propuesto se utilizará junto con el equipo existente);
- d) la exactitud requerida, incluidas la precisión y la sensibilidad aceptables;
- e) las pruebas de aceptación requeridas en la fábrica y en el lugar previsto para el equipo a fin de demostrar que el sistema (incluidos los programas informáticos) está adaptado a su finalidad;
- f) la definición de toda validación adicional que deba llevar a cabo el comprador;
- g) el grado de especialización necesario y disponible para encargarse del funcionamiento del equipo;
- h) la declaración sobre el grado de desarrollo requerido para el equipo, por ejemplo, si se aceptan tecnologías innovadoras;
- i) las piezas de repuesto de que se tiene que disponer, la identificación de los plazos de reparación para equipos defectuosos y la frecuencia requerida de mantenimiento;
- j) la financiación disponible (si se trata de una cuestión restrictiva) y la indicación de si el equipo se arrendará o comprará;
- k) el suministro de una matriz de cumplimiento en la que se muestre dónde cumple (y no cumple) el equipo con los requisitos mencionados;
- l) el suministro de los procedimientos de funcionamiento y capacitación.

Es preciso que el explotador aporte pruebas de que todas las cuestiones mencionadas se han abordado. Sobre la base de esos requisitos, debería elaborarse un plan para la caracterización de las fuentes radiactivas selladas en el que se incluya la justificación de la metodología y las técnicas seleccionadas. El plan debería ajustarse a los criterios de aceptación de los desechos de la instalación de almacenamiento o disposición final que vaya a recibir las fuentes en desuso. Además, debería elaborarse de acuerdo con las opciones y técnicas de recuperación y acondicionamiento ya definidas.

Es necesario reunir y archivar toda la información sobre las fuentes de manera estructurada para facilitar su recuperación cuando sea necesario; debería conservarse por duplicado en lugares distintos. El explotador debe realizar auditorías periódicamente para velar por que la información registrada sea correcta.

7.4.2. Recuperación de datos históricos

La recuperación, recopilación y tratamiento de los datos históricos constituyen el primer paso del proceso de caracterización [53]. Durante la recuperación de los datos puede ser necesario consultar a empleados antiguos o jubilados que puedan proporcionar información pertinente. La lista de medidas para la recuperación de los datos puede incluir:

- a) la identificación de las fuentes radiactivas selladas;
- b) la recopilación de información sobre las fuentes radiactivas selladas de interés, con inclusión de las propiedades físicas, químicas y radiológicas, el nombre del fabricante, planos, número de serie, fecha de producción, usuarios de las fuentes radiactivas selladas, certificación de pruebas de fugas, mediciones de tasas de dosis, materiales de acondicionamiento (si procede);
- c) en el caso de fuentes radiactivas selladas acondicionadas, también la identificación de las que están encapsuladas en hormigón, espuma de poliuretano, cera de parafina u otras matrices;
- d) identificación de los tipos de blindajes adicionales empleados para las fuentes radiactivas selladas (p. ej., plomo, cemento, uranio empobrecido);
- e) identificación del embalaje utilizado para las fuentes radiactivas selladas acondicionadas y no acondicionadas (p. ej., bolsas de plástico, determinados contenedores blindados de transporte, bidones, cajas de metal y madera);
- f) grupos de las fuentes radiactivas selladas para su caracterización.

7.4.3. Caracterización mediante métodos de análisis no destructivo

Si no es posible recuperar los datos históricos, debería hacerse todo lo posible para caracterizar las fuentes mediante los métodos de análisis no destructivo (AND) especificados en la referencia [53]. Si el AND de la fuente dentro del dispositivo conexo no proporciona la suficiente información para caracterizar adecuadamente la fuente radiactiva sellada, puede estudiarse la posibilidad de recuperar paso a paso la fuente del dispositivo y las estructuras de blindaje. Durante las operaciones de recuperación y caracterización, deberían tomarse todas las precauciones necesarias para garantizar que el riesgo se mantenga tan bajo como sea razonablemente posible.

Mediante las mediciones gamma pueden identificarse varias fuentes selladas con potentes energías gamma [53]. A este grupo pertenecen los radionucleidos siguientes: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{85}Kr , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{226}Ra , ^{239}Pu -Be y ^{241}Am . Algunas fuentes de neutrones compuestas como ^{241}Am -Li, ^{238}Pu -Be, ^{241}Am -Be y ^{226}Ra -Be también pueden ser identificadas midiendo los rayos gamma de alta energía que producen con las reacciones siguientes: $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$, $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ y $^7\text{Li}(\alpha, \alpha\gamma)^7\text{Li}$. Además, para la identificación de las fuentes de neutrones, pueden emplearse los rayos gamma de alta energía producidos por reacciones de activación neutrónica (n, γ) en materiales de protección (p. ej., aluminio, hierro, titanio) y materiales de blindaje de neutrones (p. ej., parafina borada). Los radionucleidos ^{238}Pu y ^{239}Pu no pueden identificarse con mediciones gamma a causa de la baja intensidad de la radiación gamma.

Por lo general, puede ser necesario obtener más información mediante técnicas más avanzadas (p. ej., métodos de análisis gamma [53]). La espectrometría gamma permite determinar los diferentes radionucleidos y, en ciertas condiciones, su actividad. Para los análisis cuantitativos, deben conocerse la absorción de rayos gamma en la matriz de desechos o el material de blindaje de las fuentes radiactivas selladas; el método principal para ello es el

empleo de la información conocida *a priori* (p. ej., la geometría de las mediciones, la densidad, la composición de la matriz) o las mediciones de transmisión.

Las fuentes radiactivas selladas que se enumeran a continuación pueden ser detectadas mediante mediciones de neutrones o métodos de recuento de neutrones pasivos o activos [53]. En este grupo están incluidas las siguientes: $^{226}\text{Ra-Be}$, ^{238}Pu , $^{238}\text{Pu-Be}$, ^{239}Pu , $^{239}\text{Pu-Be}$, $^{241}\text{Am-Be}$, $^{241}\text{Am-Li}$ y ^{252}Cf . El detector de neutrones que se utiliza más habitualmente en los sistemas AND es el contador proporcional de gas ^3He . El contador ^3He es un detector térmico de neutrones empleado para la detección de neutrones mediante su combinación con un moderador, por ejemplo, el polietileno de alta densidad. Algunos tipos de monitores portátiles de tasa de dosis están equipados con detectores BF_3 que podrían permitir la detección de fuentes de neutrones mediante la medición por contacto alrededor del blindaje o del bulto de desechos.

El empleo de métodos de caracterización sofisticados y costosos no está justificado en el caso de las fuentes radiactivas selladas, que no entrañan peligro radiológico y que no son importantes para la seguridad de la fase posterior a la clausura de la futura instalación de disposición final.

7.4.4. Caracterización con métodos destructivos

Los métodos destructivos solo deberían considerarse cuando sea absolutamente necesario. Al remitir una fuente radiactiva sellada a un laboratorio para su análisis destructivo, deja de considerarse una fuente sellada y requiere un tratamiento y acondicionamiento posteriores de conformidad con los criterios pertinentes de aceptación de desechos. En las referencias [55, 56], figuran más detalles sobre los métodos de muestreo y análisis.

7.5. CARACTERIZACIÓN DE FUENTES CON FUGAS

Antes de manipular una fuente en desuso, es necesario realizar ensayos de frote de la fuente para comprobar la ausencia de fugas (véase la figura 45). Pueden emplearse monitores de contaminación de rayos alfa, beta y X y gamma de baja energía para detectar fugas de la fuente con el método de ensayo de frote.



Fig. 45. Ensayo de frote para el control de la contaminación.

7.6. ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS

La mayoría de las fuentes selladas en desuso tendrán asociadas emisiones beta o gamma. Estas pueden detectarse con equipos sencillos, como los monitores de tubo Geiger-Müller de ventana fina o de paredes delgadas. Se prefiere, cuando estén disponibles, los monitores de centelleo porque sus tiempos de respuesta son más breves. Este equipo básico no es aplicable o no es fiable si la fuente es un emisor alfa o de neutrones, o si se trata de una fuente beta dentro de una cubierta protectora con blindaje. Es posible que se necesiten instrumentos sensibles a la radiación alfa o de neutrones si se prevé encontrar fuentes con esos radionucleidos.

Las mediciones de las tasas de dosis gamma ofrecen información básica sobre la existencia de radiación gamma y, en determinadas condiciones, pueden evaluar la actividad de las fuentes. La actividad de las fuentes radiactivas selladas se puede cuantificar midiendo la tasa de dosis, el factor de conversión de dosis a actividad y la composición de nucleidos de la fuente radiactiva sellada (si se conoce). La experiencia demuestra que las mediciones de la tasa de dosis no son suficientes para caracterizar íntegramente la fuente radiactiva sellada porque se requiere una información más detallada, como la composición de radionucleidos, los materiales del encapsulamiento, los materiales de la estructura, la matriz y el blindaje.

La mayoría de los detectores empleados en la espectrometría gamma utilizan detectores de centelleo de NaI(Tl) (baja resolución), semiconductores de HPGe (germanio hiperpuro) (alta resolución) y CdTe (resolución media). Desde hace varios años se dispone de sistemas que utilizan esos métodos, en dispositivos portátiles o sistemas con una instalación especial. Los sistemas de baja resolución requieren menos mantenimiento y no necesitan refrigeración. Un inconveniente es que solo pueden recoger y analizar espectros simples (menos de 10 picos bien resueltos en un rango de energía entre 35 y 1500 keV). No obstante, pueden emplearse para identificar las fuentes radiactivas selladas en desechos históricos si el nivel de actividad de la fuente en cuestión es lo suficientemente alto, teniendo en cuenta que esas fuentes suelen ser de un solo nucleido. Los sistemas de resolución media (CdTe) son un buen término medio entre los sistemas de alta y baja resolución. Los sistemas de alta resolución requieren refrigeración (nitrógeno líquido o refrigeración eléctrica) y suelen ser caros y menos robustos que los dispositivos de temperatura ambiente. La ventaja de un sistema de alta resolución es que puede procesar un número muy alto de picos de rayos gamma diferentes.

Desde el punto de vista de la medición, las fuentes alfa o beta blindadas son las más difíciles de detectar y medir. Las técnicas inferenciales basadas en nucleidos clave, que pueden utilizarse para caracterizar procesos bien preparados de generación y acondicionamiento de desechos, no pueden aplicarse para caracterizar las fuentes radiactivas selladas.

8. MANIPULACIÓN DE LAS FUENTES

La manipulación de la fuente comprende toda manipulación física de esta, incluido el desplazamiento, el traslado, la reubicación, la retirada de un contenedor o la introducción en él, el desmontaje de la parte del equipo en la que se ubica la fuente, la retirada de la fuente del equipo, la medición, la inspección o el análisis.

Como se ha señalado en secciones anteriores, las fuentes selladas contienen material radiactivo mucho más concentrado que el que se encuentra en otros desechos radiactivos que suelen manipularse en una instalación. Al planificar y ejecutar labores en las que hay que manipular fuentes, debe considerarse que puede aumentar la gravedad de la pérdida de control de la contaminación y que pueden darse exposiciones potencialmente elevadas durante su manipulación. Durante la manipulación de fuentes en desuso, es necesario observar las medidas de seguridad industrial y radiológica.

Las fuentes selladas pueden ser parte integral del equipo. Este equipo puede estar conectado a un proceso químico o físico y, para evitar determinados peligros, pueden requerirse precauciones especiales. Las fuentes selladas también pueden presentar una forma química o física única que puede requerir precauciones especiales. Además, las fuentes pueden presentar fugas, lo que también exigiría la imposición de medidas específicas de seguridad radiológica.

8.1. REQUISITOS DE SEGURIDAD EN LA MANIPULACIÓN

Los usuarios deben garantizar que se cumplen todos los requisitos de protección radiológica nacionales y propios de la instalación [11] y que se han dispuesto los controles apropiados para reducir el potencial de dispersión de la contaminación radiactiva y para minimizar las exposiciones individuales. Los principios básicos que se resumen en esta sección son válidos para la manipulación de todas las fuentes, ya estén en uso, identificadas como potencialmente en desuso o declaradas en desuso. Estos principios también son aplicables a todas las etapas de la gestión de las fuentes en desuso.

La instalación en la que se utilice una fuente debería estar dotada de las capacidades apropiadas para su manipulación, incluidos los instrumentos de levantamiento y elevación, la iluminación y la alimentación eléctrica y las unidades remotas y portátiles para monitorizar la contaminación y la radiación. La complejidad y sofisticación de las capacidades de manipulación están directamente relacionadas con los riesgos potenciales de las fuentes que se manipularán.

Al manipular fuentes en desuso, es necesario adoptar algunas precauciones para evitar causar daños mecánicos a la fuente (p. ej., caídas desde cierta altura o golpes con máquinas de manipulación o carretillas elevadoras); para garantizar el funcionamiento de los sistemas de seguridad del soporte de la fuente (p. ej., la integridad del mecanismo de cierre de las fuentes), y para proteger de la radiación al personal de operación. Por consiguiente, hay que observar las normas de seguridad generales e industriales.

8.2. PLANIFICACIÓN DE LABORES

La manipulación de fuentes selladas implica un riesgo radiológico potencial. El riesgo depende del tipo de radionucleido, la actividad de la fuente, su forma química y física, la condición física de la fuente y la posibilidad de fugas. Es importante evaluar íntegramente el tipo y la naturaleza de todos los riesgos implicados antes de llevar a cabo operaciones de manipulación de fuentes. Resulta necesario realizar una estimación de la dosis de exposición radiológica para el procedimiento concreto de manipulación a fin de prever medidas de seguridad y protección radiológica.

Al planificar y ejecutar la manipulación de las fuentes, deberían estudiarse los factores que pueden afectar a la seguridad de la fuente y dar lugar a una posible exposición de los trabajadores y el público, o a la contaminación del medio ambiente. Con independencia de la fuente que se manipule, hay que tener en cuenta los siguientes factores: desnuda, en un contenedor, como bulto de transporte o en su cubierta protectora o recinto originales en los que se haya utilizado como parte de un aparato. Todas las operaciones de manipulación deberían planificarse, probarse y ejecutarse junto con el personal de protección radiológica.

Aparte de las preocupaciones relativas a la protección radiológica, la manipulación de las fuentes suele requerir la manipulación y el desplazamiento de objetos pesados y voluminosos, la utilización de equipo de aparejado y elevación y otros equipos de desplazamiento de materiales, además de la utilización de instrumentos estándar para abrir y cerrar los contenedores. Deberían evaluarse todos los riesgos relativos a la seguridad industrial y utilizarse todos los métodos de protección que corresponda.

En la planificación, debería incluirse:

- a) el examen de los documentos de licencia expedidos por el órgano regulador, velando por que las operaciones de manipulación de fuentes que se vayan a realizar estén autorizadas y que se cumplan los requisitos específicos de la licencia;
- b) el examen de las características de las instalaciones para garantizar la existencia de vías de acceso y salida adecuadas, para asegurar que los sistemas de blindaje y de tratamiento del aire instalados son apropiados o si pueden complementarse para apoyar la labor específica, para determinar los requisitos en cuanto a instrumentos y equipos y velar por que estos se satisfacen, además de para garantizar que se dispone de zonas de operaciones y almacenamiento;
- c) la identificación de las fuentes que se manipularán;
- d) la definición y secuenciación precisas de las tareas a ejecutar;
- e) la constatación de que los operadores están capacitados y cualificados para realizar el trabajo, y de que cuentan con experiencia específica tanto en las tareas a realizar como en los tipos y las actividades de las fuentes a manipular;
- f) la identificación y adecuación de la respuesta a incidentes o emergencias.

8.3. MANIPULACIÓN RUTINARIA DE FUENTES

8.3.1. Recogida

El primer paso en la manipulación de una fuente en desuso es su recogida, del usuario o del lugar en que fue recuperada, para su almacenamiento seguro, a la espera de una decisión sobre el próximo paso en su gestión. Esta labor suele llevarla a cabo la organización central de gestión de los desechos radiactivos o una organización similar, como puede ser el organismo nacional de gestión de desechos radiactivos. Antes de la recogida, es necesario reunir toda la información posible sobre la fuente.

La medida más inmediata que ha de adoptarse una vez que se ha localizado una fuente huérfana es garantizar la protección adecuada de los miembros de la población presentes en las proximidades. Los peligros que presenta para el público una fuente huérfana variarán tanto en el tipo como en la gravedad del peligro, en función tanto de las fuentes como de las condiciones de la ubicación en que se encuentren, por lo que la medida de protección más conservadora y a la vez más eficaz, en todas las circunstancias, es aislar a la población de la fuente. El potencial de exposición tanto externa como interna puede reducirse si se restringe el acceso y se mantiene a la población alejada de la fuente. El control de acceso al emplazamiento de una fuente huérfana puede establecerse mediante la erección de barreras, la colocación de señales o etiquetas, la cobertura de la fuente, comunicaciones personales u otros medios.

La recogida adecuada de una fuente con fugas es una operación difícil, ya que puede dar lugar a la propagación de la contaminación. Por lo tanto, para llevar a cabo esta operación, en la que se incluye la comprobación de fugas, se necesita personal debidamente cualificado y experimentado. Es necesario sobreembalar la fuente con fugas y cubrir las zonas donde se manipulará, por ejemplo, con una lámina de plástico para facilitar la descontaminación y evitar la propagación de la contaminación.

8.3.2. Segregación

Teniendo en cuenta la necesidad de optimizar las siguientes operaciones de gestión de desechos (es decir, la capacidad de manipular equipos, equipos de blindaje, equipos de monitorización, embalaje, contenedores de almacenamiento), las fuentes en desuso pueden clasificarse y agruparse en función de la opción de gestión que

se aplicará, o de las características de la fuente (radionucleidos, período de semidesintegración, actividad, forma química y física) o por tipos únicos de fuentes, como las fuentes de radio o las fuentes de neutrones.

Uno de los primeros factores a tener en cuenta para clasificar y segregar las fuentes es si la fuente está instalada en un dispositivo o es una fuente independiente. Todas las fuentes instaladas dentro de un dispositivo y que deban ser desmontadas deberían segregarse y disponerse en una zona de almacenamiento apropiada.

El siguiente grupo de fuentes que podría segregarse como inventario único es el de aquellas que tienen una actividad baja y un período de semidesintegración extremadamente corto, que cumplan los requisitos del Estado Miembro para permitir que la fuente se descomponga hasta que las mediciones den como resultado la ausencia de actividad detectable. Suelen ser solo las fuentes que contienen nucleidos con período de semidesintegración inferiores a 120 días. Tras la segregación de los dispositivos en los que serán necesarios el desmontaje y la retirada de las fuentes con nucleidos cuya disposición final puede ser la desintegración, las fuentes restantes pueden clasificarse y segregarse por una combinación de características, incluidas las posibles vías de disposición final, tipos especiales de fuentes y las fuentes de actividad alta que no se pueden manipular con instrumentos manuales de corta o larga distancia.

Las fuentes restantes para el almacenamiento y la disposición final pueden clasificarse con más detalle, como se muestra en la figura 46. Es probable que la disposición final de las fuentes beta-gamma y los emisores alfa de períodos de semidesintegración cortos (no transuránicos) se realice en instalaciones de disposición final a poca profundidad con configuraciones similares. En la mayoría de los casos, es probable que la disposición final de los emisores alfa de períodos de semidesintegración largos no pueda hacerse en instalaciones poco profundas, por lo que permanecerán segregados, en almacenamiento, hasta que se disponga de una opción adecuada. Las fuentes de neutrones, las fuentes de radio y las fuentes de actividad alta se segregarán por sus requisitos específicos de acondicionamiento y manipulación.

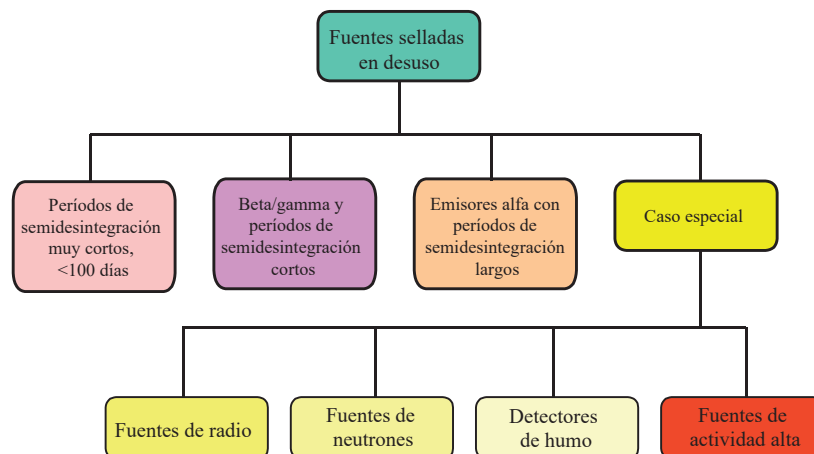


Fig. 46. Segregación operacional de fuentes radiactivas en desuso.

Las fuentes con características similares en lo concerniente al almacenamiento y la disposición final deberían embalsarse conjuntamente. En esta etapa, también es posible restringir el contenido del contenedor para asegurar el cumplimiento de las limitaciones impuestas a la actividad y tasas de dosis.

Si una fuente está dañada, tendrán que contenerse las fugas posibles. Es preciso segregar las fuentes con fugas de las demás y recogerlas por separado para evitar la contaminación cruzada. Debería comprobarse si hay contaminación en los dispositivos, que se ubicarán posteriormente en un embalaje que cumpla los requisitos de almacenamiento propios de la instalación. La contención provisional de dispositivos puede realizarse, por ejemplo, embalando la cubierta protectora con láminas de plástico o colocando los dispositivos en cubos de basura o bidones de acero y sellando la tapa. Por lo general, estos dispositivos pueden conservarse en un almacenamiento a largo plazo con o sin más embalaje hasta que se cuente con otra opción de disposición final. En algunos casos, será necesaria la colocación de varios dispositivos en grandes contenedores de almacenamiento. Debería generarse, mantenerse y suministrarse a la instalación un inventario completo de todos los dispositivos incluidos en cada gran contenedor de la forma requerida. A excepción de consideraciones relativas a la seguridad física en el caso

de fuentes de actividad alta y de un número muy grande de dispositivos con fuentes más pequeñas, no suele haber justificación para retirar las fuentes de los dispositivos a fin de mantenerlas almacenadas si no se cuenta con una vía de disposición final.

8.3.3. Extracción de las fuentes de sus dispositivos

El almacenamiento y la disposición final del material radiactivo suelen ser caros y, por tanto, en caso de que haya un gran número de fuentes DSRS, puede estudiarse la retirada de las fuentes de sus dispositivos originales y su agrupación con otras fuentes similares para su almacenamiento o disposición final. Con esta opción, se reduce el volumen de bultos de fuentes DSRS para su almacenamiento o disposición final.

Las fuentes, una vez retiradas de los dispositivos, pueden transferirse a contenedores blindados para su almacenamiento. Los contenedores de almacenamiento pueden normalizarse, y pueden optimizarse las medidas de seguridad física y tecnológica. Sin embargo, hay que tener cuidado para evitar que se dañe la fuente o que su integridad física se vea afectada durante el proceso de retirada. Las fuentes dañadas y con fugas requieren precauciones adicionales, así como un equipo especializado que proporcione tanto blindaje como contención.

El contenedor blindado, que albergará finalmente la fuente, debería estar diseñado para que la tasa de dosis superficial sea aceptable y prever también la protección de la fuente con arreglo a los reglamentos pertinentes, así como reducir al mínimo la posibilidad de recuperación no autorizada de la fuente. Estos contenedores deberían ofrecer una gran capacidad interna y una flexibilidad considerable para el almacenamiento de fuentes. Cuando sea posible, los contenedores deberían incluir una sola configuración, ya sea fuentes retiradas de los dispositivos o fuentes dentro de sus dispositivos. No deberían mezclarse ambas en ningún contenedor.

Sin embargo, la retirada de las fuentes de sus dispositivos comporta la manipulación de fuentes desnudas, lo que exige una competencia especial, un lugar de trabajo bien diseñado y blindado e instrumentos para proteger al personal de operaciones de una posible exposición radiológica elevada y contaminación radiactiva. Solo las organizaciones que manipulan fuentes desnudas habitualmente tienen estos conocimientos especializados e infraestructuras, como los fabricantes de fuentes y dispositivos, el personal de mantenimiento de fuentes o dispositivos o el personal de organizaciones de gestión de desechos que gestionan periódicamente grandes cantidades de fuentes en desuso. En principio, por razones de protección radiológica ocupacional, las fuentes de las categorías 1 y 2 deben manipularse únicamente en determinadas instalaciones de celdas calientes o celdas calientes móviles, por los operadores cualificados y autorizados de los fabricantes de fuentes y organizaciones de reciclado. La manipulación de las fuentes desnudas de la categoría 3 y de la gama superior de la categoría 4 también requiere conocimientos especializados, equipos y autorizaciones especiales.

Es necesario evaluar cuidadosamente, caso por caso, por qué se retira la fuente de su contenedor original. En el caso de las fuentes que no tienen una vía definida para su disposición final, puede ser más apropiado dejarlas en los dispositivos hasta el momento en que se cuenta con una vía de disposición final o hasta que el espacio de almacenamiento resulte limitado. Además, nadie sin capacitación y cualificaciones debería intentar retirar las fuentes de estos tipos de dispositivos. En el caso de fuentes de actividad alta, la extracción de las fuentes de su soporte original no se contempla como posibilidad salvo si es absolutamente necesario.

Durante los preparativos para la retirada de la fuente, es preciso tener en cuenta los aspectos siguientes:

- a) es deseable conocer la distribución de dosis dentro del equipo original de la fuente en las posiciones de marcha y de apagado;
- b) debería disponerse de un manual de mantenimiento (en especial en lo concerniente al mecanismo de movimiento de la fuente radiactiva sellada, solución de problemas y reparaciones diversas) que sea fácil de llevar a la práctica;
- c) los instrumentos, los materiales, las partes y el equipo especial necesarios para las labores deberían estar disponibles y revisados;
- d) pueden resultar útiles los datos relativos al diseño, diagramas y fotografías o ilustraciones;
- e) se debería garantizar que las fuentes de alimentación y los enclavamientos de seguridad del mecanismo de la fuente u otros instrumentos o equipos estén en la posición de “encendido/apagado” según se requiera y que no se puedan encender o apagar de forma involuntaria durante los trabajos por una manipulación ilícita;
- f) el movimiento de cajón de la fuente y la alineación del puerto de descarga deberían estar garantizados y no requerir una inspección directa o un ajuste manual durante el transporte de la fuente;

- g) deberían estudiarse detenidamente problemas imprevistos por el atasco de mecanismos y debe disponerse de soluciones a esos posibles problemas antes de iniciar las labores en sí. Debería tenerse en cuenta que la máxima protección está garantizada cuando la fuente se encuentra en el equipo original o en el blindaje de almacenamiento de destino.

8.3.4. Reubicación dentro del emplazamiento

La reubicación dentro del emplazamiento se refiere al movimiento de una fuente dentro del emplazamiento del licenciario. Después de que se declare una fuente en desuso, esta debería retirarse del lugar de operaciones y reubicarse en una zona de almacenamiento. Los desplazamientos de fuentes radiactivas selladas por el emplazamiento del licenciario no suelen estar regulados por los reglamentos nacionales de transporte. La reubicación de una fuente radiactiva sellada dentro del emplazamiento del licenciario suele estar regulada en la normativa propia del emplazamiento. Cabe señalar que muchos licenciarios, especialmente en empresas pequeñas con personal limitado, están autorizados a utilizar la fuente, pero no a manipularla por sí mismos. En esos casos, el licenciario necesita contratar a una empresa externa autorizada para hacerlo.

8.4. EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA LA MANIPULACIÓN DE LAS FUENTES

En las operaciones de rutina, las fuentes radiactivas se manipulan en los dispositivos originales, en contenedores de transporte o en otros blindajes que protegen a los operadores de dosis altas de radiación. Los bultos pueden manipularse manualmente o con una carretilla elevadora. Cuando, por razones específicas, haya que manipular fuentes radiactivas desnudas, el operador debería estar lo más lejos posible de las fuentes para reducir al mínimo la dosis.

La manipulación de fuentes selladas puede generar falsas expectativas en cuanto al control de la contaminación. Incluso las fuentes antiguas que se utilizan desde hace años pueden mantener la apariencia de fuentes nuevas. No es raro que los operadores experimentados que manipulan las fuentes se descuiden y asuman que las fuentes que manejan están intactas y carecen de fugas. Los usuarios deberían fomentar la actitud de que las fuentes y los dispositivos que las contienen están contaminados mientras no se demuestre lo contrario.

8.4.1. Pinzas y blindaje temporal

Las fuentes de actividad baja que emiten radiaciones de baja energía suelen poder manejarse manualmente (figura 47) o con instrumentos de manipulación de alcance corto, como pinzas o tenazas (figura 48). Entre las fuentes de este tipo figuran las fuentes de calibración, las fuentes utilizadas en aplicaciones médicas, las fuentes de comprobación y algunas fuentes utilizadas en dispositivos industriales. La manipulación de esas fuentes no suele requerir ningún blindaje.



Fig. 47. Manipulación manual de fuentes.



Fig. 48. Instrumentos de corto alcance para la manipulación manual de fuentes.

Algunas fuentes de mayor actividad y tasas de dosis que las descritas anteriormente también pueden manipularse manualmente con los instrumentos adecuados, como pinzas largas (figura 49), pero es necesario blindar esas fuentes para reducir las dosis recibidas por el operador (figura 50). Las fuentes más comunes de este grupo son las fuentes de braquiterapia de baja tasa de dosis con cesio y las fuentes de calibradores de espesor (^{85}Kr , ^{90}Sr), calibradores de nivel de carga o calibradores de espesor (^{137}Cs), densímetros (^{137}Cs), medidores de humedad y densímetros (^{241}Am - Be - ^{137}Cs), densitometría ósea (^{109}Cd) y eliminadores de electricidad estática.



Fig. 49. Pinzas largas y su empleo en manipulación de fuentes.

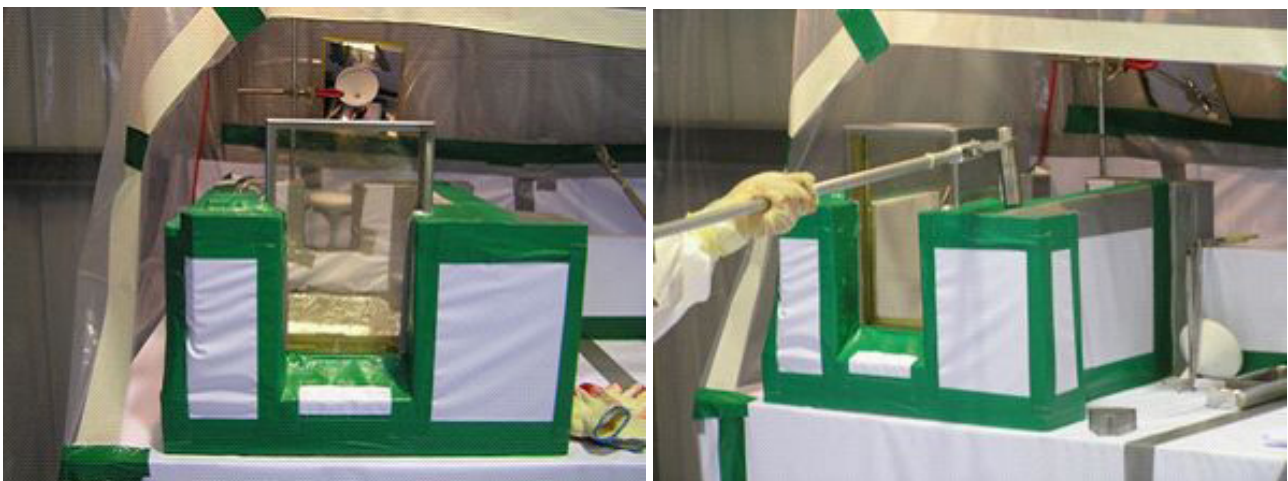


Fig. 50. Instalación de blindaje de plomo y vidrio al plomo y manipulación de la fuente.

El blindaje temporal puede emplearse eficazmente durante las operaciones de manipulación de fuentes para reducir las dosis que reciben los trabajadores. Al elegir y emplear el blindaje, los usuarios deberían tener en cuenta lo siguiente:

- El blindaje en exceso o localizado de manera que impida las actividades laborales puede, en realidad, aumentar la dosis que reciben los trabajadores. El rendimiento laboral y la posible reducción de la dosis que ofrece el blindaje debería sopesarse cuidadosamente para encontrar un equilibrio eficaz.
- Deberían elegirse materiales de blindaje apropiados para su uso.
- Deberían proporcionarse vidrios al plomo u otras ventanas que permitan a los usuarios ver cuando el blindaje se coloque entre ellos y la fuente.

8.4.2. Cabinas herméticas

Si hay que manipular fuentes de actividad baja o fuentes de radio con fugas o contaminadas, un medio sencillo, seguro y eficaz para proteger al operador y evitar la propagación de la contaminación es una cabina hermética (o caja de guantes). Una cabina hermética es un armario de seguridad con una abertura a través de la que el operador puede realizar manipulaciones en su interior con un extractor que expulsa continuamente aire del interior a una velocidad suficiente para evitar el escape de la contaminación aerotransportada generada dentro de la cabina (figura 51). En el interior de la cabina se podría montar un blindaje temporal en forma de ladrillos de plomo para reducir la dosis que recibe el operador al manipular fuentes con una alta tasa de dosis. Este enfoque reduciría al mínimo el costo y maximizaría la flexibilidad para proporcionar un entorno de trabajo seguro para los operadores.



Fig. 51. Manipulación de fuentes selladas de actividad baja en una caja de guantes.

En la cabina hermética, en la que el espacio es escaso, se puede lograr una separación máxima entre el operador y las fuentes mediante el uso de pinzas o tenazas largas (figura 52).

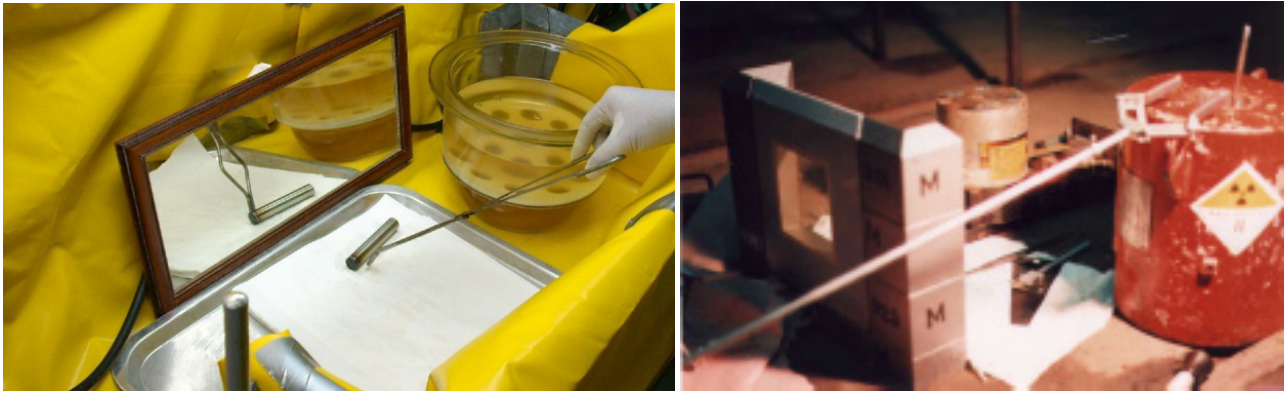


Fig. 52. Desplazamiento de una fuente sellada con pinzas manuales largas.

Debe comprenderse que los trabajos de manipulación con pinzas y tenazas permiten levantar únicamente masas pequeñas (hasta un máximo de 2 kg en condiciones de confort).

8.4.3. Celdas calientes

Una fuente de actividad alta no siempre puede extraerse del equipo en los locales del usuario. Esa circunstancia puede ser debida a que el equipo se diseñó para ser desprovisto de su fuente en una celda blindada o porque no se dispone de la información técnica suficiente para hacerlo de forma segura fuera de la celda blindada. En estos casos, es necesario transportar la fuente dentro de su blindaje operacional para retirarla una vez se reciba en una instalación blindada, como puede ser una celda caliente. Las celdas calientes equipadas con manipuladores remotos o esclavos varían ampliamente en sofisticación y complejidad, pero la mayoría de ellas son perfectamente adecuadas dependiendo de las fuentes que se manejen (figura 53).

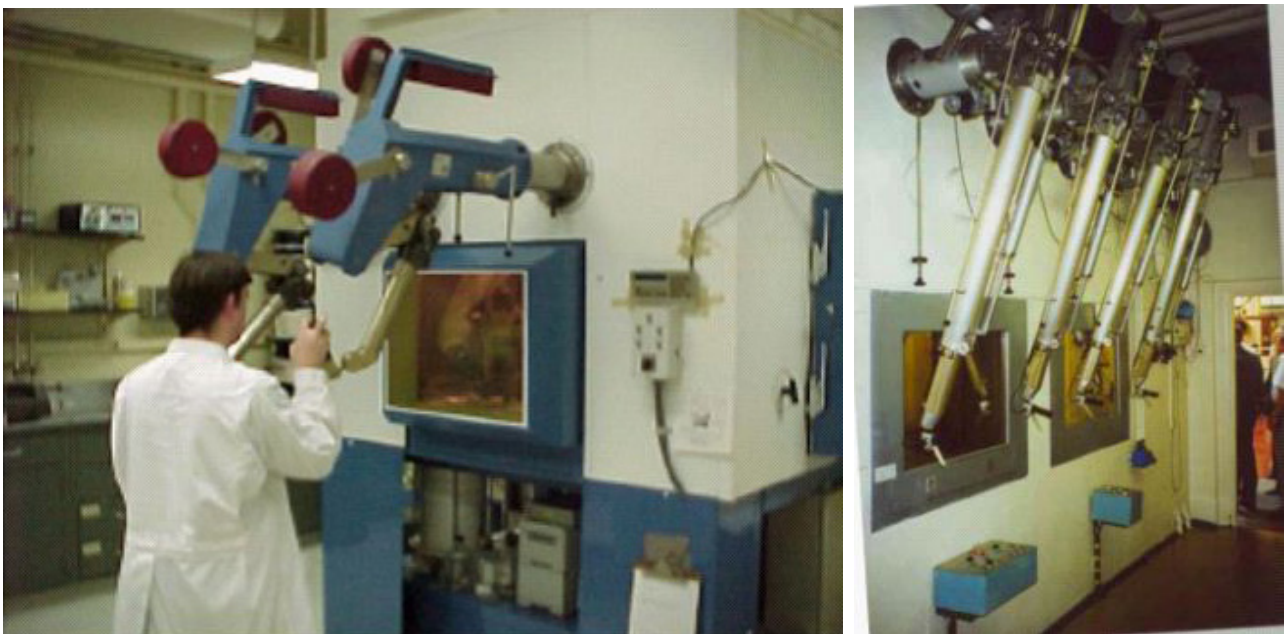


Fig. 53. Celdas calientes con manipuladores remotos o esclavos.

8.4.4. Contenedores

Al reubicar las fuentes en desuso dentro del emplazamiento del licenciataria, es importante mantenerlas en el contenedor original. En el caso de los equipos de radiografía o teleterapia, es necesario mantener debidamente

en su ubicación blindada las fuentes en desuso. Si se utilizan contenedores distintos de los originales, el diseño del nuevo contenedor debería tener en cuenta la geometría de la fuente, el radionucleido, su actividad y los requisitos de manipulación. En la figura 54 se muestra un ejemplo de un contenedor habitual utilizado para la reubicación dentro del mismo emplazamiento.



Fig. 54. Contenedor para fuentes selladas beta-gamma.

Es preciso etiquetar convenientemente los contenedores o dispositivos empleados en la reubicación de una fuente radiactiva sellada dentro del mismo emplazamiento para advertir del peligro potencial. Es importante que la señal de advertencia esté en el idioma local, así como en el idioma del fabricante. El uso del símbolo del trébol por sí solo no es suficiente ya que el significado puede no entenderse.

Los principales requisitos del diseño para los contenedores empleados en la reubicación de fuentes radiactivas selladas dentro del mismo emplazamiento son los siguientes:

- El embalaje preservará la contención y la integridad del blindaje durante el proceso de reubicación. Es necesario que el contenedor se cierre mecánicamente cuando se someta a las tensiones físicas asociadas al traslado durante la reubicación.
- La tasa de dosis máxima en el contenedor debe ser tan baja como sea razonablemente posible y acorde a los requisitos de protección contra la radiación del titular de la licencia. En todo caso, la tasa de dosis máxima no debería sobrepasar los límites previstos en el Reglamento de Transporte del OIEA, esto es, <2 mSv/h en superficie y $<0,1$ mSv/h a 1 m de la superficie del bulto en todo momento durante el traslado [47].
- La contaminación radiactiva de las superficies de los contenedores debería ser lo más baja posible y conforme a los requisitos de protección radiológica del licenciario. En todo caso, la contaminación radiactiva no debería sobrepasar los límites previstos en el Reglamento de Transporte del OIEA: 4 Bq/cm² para los emisores beta y gamma y los emisores alfa de toxicidad baja y $0,4$ Bq/cm² para todos los demás emisores alfa.

8.4.5. Equipos de levantamiento y transferencia

Se utilizan diversos equipos de levantamiento y traslado para las fuentes en desuso, dependiendo de sus actividades, tamaño y peso. La figura 55 muestra un ejemplo de equipo de levantamiento empleado para un cabezal de teleterapia de gran peso.



Fig. 55. Aparejado y elevación de un cabezal de teleterapia.

Normalmente, una carretilla de mano, con una capacidad de 500 kg, sería adecuada para la operación de traslado. Se necesitaría una carretilla elevadora de operación manual con un accesorio de agarre de bidones en el almacén para descargar la fuente del carro. Una carretilla elevadora eléctrica (figura 56) sin duda requeriría menos esfuerzo manual y sería lo más apropiado para las fuentes en desuso de gran peso y si se tuviera que manipular un gran número de fuentes en un corto espacio de tiempo. Además de las carretillas elevadoras, acoplar una grúa permitirá elevar las fuentes de gran peso (figura 57), su traslado por la instalación y la retirada de los envases de blindaje de los contenedores de transporte, así como las correas de elevación, los grilletes, las cadenas y las argollas.



Fig. 56. Carretilla elevadora eléctrica.



Fig. 57. Manipulación de un bidón de desechos de 200 l con carretilla de horquilla elevadora.

8.5. PROBLEMAS ENCONTRADOS AL MANEJAR FUENTES DE ACTIVIDAD ALTA

La preparación de la fuente para su almacenamiento puede adoptar dos formas: la fuente puede retirarse de su lugar de operación y trasladarse a un emplazamiento de almacenamiento controlado por la organización usuaria (esta opción se aplica a las fuentes de las categorías 1 a 5). Otra posibilidad es que la fuente se almacene en condiciones de seguridad en el lugar de operación (esta opción se considera principalmente para las fuentes de la categoría 1).

Si se selecciona la primera opción mencionada para las fuentes de las categorías 1 y 2, se necesita la infraestructura suficiente (esto es, industrial y nuclear) para llevar a la práctica la opción. En esta etapa, el proceso no incluye ni la separación de las fuentes del blindaje de trabajo ni la desactivación de ningún mecanismo de enclavamiento o característica de seguridad, con lo que la fuente se retiene dentro de su blindaje y en una posición no expuesta. Es preciso que el traslado de la fuente desde su blindaje operativo hasta un contenedor de transporte lo realice personal capacitado conforme a procedimientos aprobados. El contenedor de transporte está diseñado específicamente para el equipo, en el que se puede llevar a cabo el traslado de la fuente sin exponerla. Es importante subrayar que la eficacia del blindaje original y todas las características de seguridad tecnológica y seguridad física se mantienen en esta etapa de la operación.

Si el equipo de la categoría 1 es de instalación fija, el almacenamiento dentro del mismo emplazamiento es una opción que podría aplicarse, manteniendo la fuente en su posición no expuesta (figura 58). Es necesario tomar medidas para garantizar que la fuente se mantenga en la posición no expuesta, protegida de las condiciones ambientales, y que la posibilidad de intrusión sea mínima. La inspección de una instalación de este tipo debe llevarse a cabo de manera rutinaria. Si el estado de almacenamiento seguro de la fuente (posición blindada) se logra mediante el almacenamiento húmedo (en el caso de los irradiadores de tipo piscina), la calidad y el nivel del agua deben mantenerse durante todo el tiempo de almacenamiento.

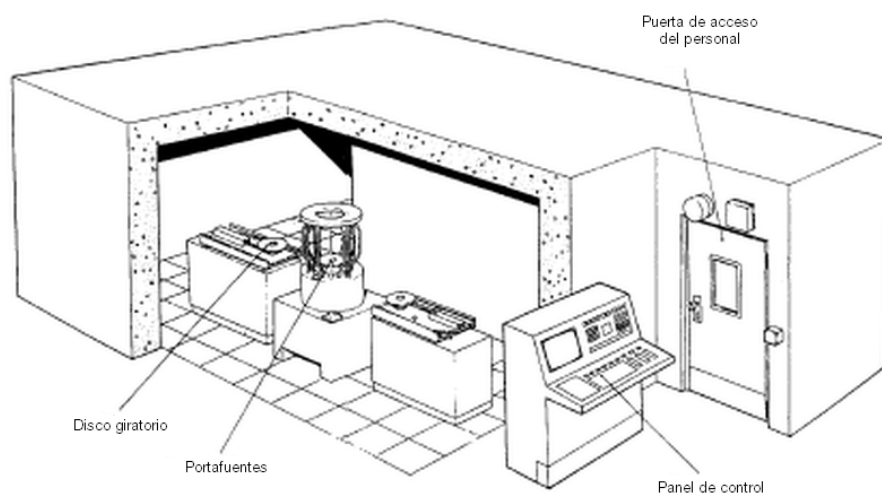


Fig. 58. Vista panorámica de un irradiador normal de almacenamiento en seco de fuentes.

Las fuentes de la categoría 1 necesitan una protección adicional con mecanismos de asistencia para asegurar que la fuente no queda expuesta involuntariamente. No obstante, es necesario diseñar mecanismos para permitir la retirada de la fuente en una fecha posterior. Es preciso adherir al mecanismo de seguridad física una etiqueta duradera, en la que se identifique su función, el motivo de su instalación, las advertencias o precauciones que deberían hacerse públicas y la referencia a las instrucciones y la autorización que puedan ser necesarias para su retirada.

9. ALMACENAMIENTO

El almacenamiento se define como la colocación de fuentes radiactivas, combustible gastado o desechos radiactivos en una instalación dispuesta para su contención, con la intención de recuperarlos [1]. Es, por definición, una medida provisional que puede ponerse en práctica en el emplazamiento o en una instalación de almacenamiento diseñada y construida a tal efecto. Según se establece en el Código de Conducta, los Estados deben asegurarse de que las fuentes selladas no permanezcan almacenadas durante períodos prolongados en instalaciones que no hayan sido diseñadas para ello. La decisión sobre la mejor manera de gestionar el período de almacenamiento hasta el momento de la clausura definitiva y la disposición final debería tomarla la parte principal, con la aprobación del órgano regulador, teniendo en cuenta las circunstancias específicas de la instalación [30].

El almacenamiento en los locales del usuario (el denominado almacenamiento en el emplazamiento) de una DSRS puede ser necesario ya sea para posibilitar la reducción de la actividad de la fuente hasta alcanzar los niveles de dispensa [11, 57-59] o bien antes de su traslado a otro lugar. Con la aprobación del órgano regulador competente, una fuente cuya actividad total o cuya concentración de actividad sea inferior a los niveles de exención especificados en las NBS [11] puede quedar exenta de algunos o de todos los requisitos de las NBS relativos a la notificación, el registro o la concesión de licencias, y ser sometida a disposición final en un vertedero aprobado. El período de almacenamiento en el emplazamiento debería ser tan breve como sea factible. Cabe señalar que mantener una DSRS almacenada en el emplazamiento sin cumplir los requisitos pertinentes es la causa más común de accidente y de pérdida de control de las fuentes. No obstante, cabe reconocer que puede que durante algún tiempo no haya ninguna alternativa viable al almacenamiento en el emplazamiento.

No es probable que en la instalación del usuario puedan mantenerse los controles administrativos y la seguridad física durante el tiempo necesario para que la actividad de la fuente se reduzca hasta alcanzar los niveles requeridos. El almacenamiento en el emplazamiento ha de incluir los planes para ese traslado, y es preciso mantener las fuentes almacenadas en condiciones para facilitar su transporte y la recuperación de la fuente de su portafuente en esta etapa.

Los países que hacen uso intensivo de fuentes radiactivas selladas y tienen fuentes DSRS en muchas instituciones necesitan un almacén centralizado y un sistema de almacenamiento apropiado para fuentes DSRS. En la referencia [60] se describe un diseño de referencia del OIEA para una instalación centralizada de almacenamiento de fuentes DSRS. Es preciso destacar que la mayor parte de los Estados Miembros no tienen a su disposición instalaciones de disposición final apropiadas y, por ende, en la mayoría de los casos el almacenamiento a largo plazo es la única alternativa para la gestión de las DSRS en el futuro previsible. En la práctica, no es habitual que un almacén central se utilice exclusivamente para fuentes DSRS acondicionadas, sino para otros tipos de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia generados en el país.

Un bulto que contenga una DSRS se considerará como la primera barrera contra la emisión de radiactividad al medio ambiente. Las barreras más importantes son, ante todo, la cápsula de la fuente propiamente dicha y, en segunda instancia, el contenedor. La última barrera física contra la emisión de radiactividad es el edificio de almacenamiento. Será necesario que el edificio de almacenamiento proporcione a las fuentes almacenadas la protección suficiente para optimizar la vida útil de los bultos, y ello puede requerir el control y la monitorización ambiental del edificio. Los requisitos de seguridad para la protección de la salud humana y el medio ambiente se satisfarán mediante el diseño, la construcción, la explotación y el mantenimiento apropiados de las respectivas instalaciones y mediante el diseño apropiado de los bultos destinados al almacenamiento.

9.1. REQUISITOS DE DISEÑO DE LOS BULTOS DE FUENTES DSRS

Todos los bultos de desechos que contengan una DSRS y estén destinados a su almacenamiento deben necesariamente cumplir un conjunto básico de requisitos (denominados, por regla general, requisitos de aceptación de desechos o criterios de aceptación de desechos) especificados por el explotador de la instalación de almacenamiento [61, 62]. Esos requisitos se basan en la evaluación de la seguridad y consideraciones conexas, así como en cuestiones tecnológicas y jurídicas. Los requisitos normalmente son examinados y aprobados por el órgano regulador, o puede ser el órgano regulador el que los especifique. Los requisitos generales de aceptación

para el almacenamiento aplicables a los bultos de desechos se describen en la referencia [61]. En el contexto de las DSRS, un bulto destinado al almacenamiento deberá:

- a) Consistir en un contenedor y una fuente incorporada y, si fuese necesario, tener un sistema adicional de contención (p. ej., un revestimiento estanco o un sobreembalaje) que albergue el contenido radiactivo durante el almacenamiento y garantice que cualquier emisión de material radiactivo se mantenga por debajo de los límites especificados.
- b) Tener una cubierta con dispositivos de ajuste para impedir que esta se separe del cuerpo del contenedor durante las actividades habituales de manipulación y almacenamiento.
- c) Tener una tasa de dosis en contacto y un nivel de contaminación que cumplan los requisitos de la instalación de almacenamiento. Si presenta contaminación, estar sujeto a las medidas necesarias para contener la contaminación durante el período de almacenamiento provisional previsto. Tener establecida una tasa de dosis máxima permitida en la superficie correspondiente a una instalación de almacenamiento provisional específica o partes de la instalación.
- d) Proveer una refrigeración pasiva adecuada de las fuentes de actividad alta (desechos generadores de calor), si las hubiese presentes.
- e) Poseer una determinada resistencia mecánica para sujetar una pila de varios bultos (se especificará para una instalación de almacenamiento concreta).
- f) Ser identificable unívocamente y tener una placa en la que conste el tipo de bulto, el número de serie, el peso y el identificador de registro (véanse ejemplos de etiquetas en la figura 59).



Fig. 59. Etiquetado de bultos preparados para su almacenamiento y transporte.

Si hay una instalación de disposición final disponible es necesario comparar los requisitos de aceptación de desechos del repositorio con los de la instalación de almacenamiento, y para los bultos de fuentes DSRS deberían elegirse los criterios más restrictivos. Los bultos de fuentes pueden estar sujetos a otras restricciones a causa de limitaciones o condiciones especiales propias de la instalación de almacenamiento que no existan en el

emplazamiento de disposición final. Por ejemplo, la carga sobre el suelo y las dimensiones de la entrada pueden limitar el tamaño y el peso de los bultos que se permita almacenar.

9.2. REQUISITOS DE DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE ALMACENAMIENTO

Los requisitos funcionales del sistema de almacenamiento han de tener en cuenta todos los requisitos de los usuarios del sistema, comprendidas sus propias especificidades e intereses; tienen que basarse en objetivos y tareas del sistema. Los requisitos de seguridad establecidos en la referencia [27] en relación con la protección de la salud humana y el medio ambiente son aplicables al almacenamiento de desechos radiactivos, incluido el almacenamiento de fuentes DSRS.

Los requisitos de diseño de las instalaciones de almacenamiento de desechos se describen detalladamente en las referencias [61-63]. Según proceda, una instalación de almacenamiento debería tener un diseño robusto sencillo, contener las mínimas instalaciones, evitar los sistemas automáticos sofisticados, basarse en la seguridad pasiva y mantener un funcionamiento simple y eficaz en relación con el costo.

Los requisitos de diseño generales para las instalaciones de almacenamiento de fuentes DSRS son los siguientes:

- a) Las instalaciones de almacenamiento deberían diseñarse de manera que la probabilidad y las consecuencias de incidentes y accidentes se reduzcan al mínimo. Estará prevista la recuperación de las fuentes para su acondicionamiento, reacondicionamiento o reubicación en caso de accidente.
- b) El almacén dispondrá de medios para mantener la integridad de la fuente y de su contenedor o dispositivo hasta que sean despachados a otro lugar (es decir, a un repositorio). Es necesario estudiar la manera de garantizar la protección contra los efectos ambientales, por ejemplo, la lluvia, la humedad, inundaciones o incendios.
- c) El almacén debe necesariamente hallarse en un lugar separado y alejado de los lugares de trabajo u otras zonas visitadas habitualmente por el personal o el público.
- d) Se requiere facilidad de acceso, también para el traslado de las fuentes al almacén y desde este (p. ej., traslado en ascensor en vez de por escalera).
- e) Es necesario tomar en consideración la capacidad de carga sobre el suelo.
- f) Las barreras físicas contra intrusiones pueden incluir, según corresponda, vigilancia, cerraduras de alta seguridad, sistema de alarma, guardias capacitados o una combinación de estos. Las medidas de protección física han de tomarse en consideración como un todo, teniendo en cuenta el efecto combinado de las precauciones individuales.
- g) Se requieren señales y advertencias claras en el almacén y su perímetro para indicar la presencia de radioactividad y el acceso restringido y no autorizado. El diseño de los carteles de advertencia debería garantizar que la naturaleza del riesgo sea obvia para el personal que pueda encontrarse con ellos. Estos carteles tienen que instalarse necesariamente, incluso aunque haya medidas de seguridad física instituidas, y deben estar escritos en idiomas que las personas que posiblemente entren en la instalación puedan comprender.
- h) El almacén ha de ser suficientemente grande como para que las fuentes puedan almacenarse de forma ordenada y que cada grupo de fuentes pueda identificarse visualmente.
- i) Las superficies del almacén tienen que ser lisas para facilitar la posible descontaminación.
- j) El diseño del almacén debería permitir almacenar las DSRS separadas del material no radiactivo.
- k) El diseño del almacén debería permitir almacenar separadamente (en zonas del almacén claramente separadas) las fuentes almacenadas a efectos de reducción de actividad, las fuentes en uso y las fuentes no aptas para la reducción de actividad.
- l) Las fuentes de actividad alta de las categorías 1 y 2 han de almacenarse preferiblemente en un almacén separado o, al menos, en una zona separada claramente indicada. Las personas autorizadas para acceder a este almacén o zona deberían estar convenientemente capacitadas en lo que respecta a la presencia e importancia de esas fuentes.
- m) El diseño del almacén debería proveer blindaje (en los muros o bien mediante material móvil de blindaje) para garantizar que la tasa de dosis en cualquier punto accesible dentro o fuera del almacén no exceda los límites aplicables prescritos por el órgano regulador. También pueden aplicarse los principios de autoblandaje

y disponer así las fuentes de manera que las unas proporcionen blindaje a las otras. Cuando se necesita un acceso frecuente del personal al almacén es importante estudiar la posibilidad de instalar un blindaje apropiado.

- n) Es necesario contar con la ventilación apropiada si se prevé que pueda haber emisión de material radiactivo a la atmósfera, especialmente cuando se almacenen cantidades significativas de ^{125}I , ^{131}I o ^{226}Ra .

Algunas instalaciones de almacenamiento antiguas poseen compartimentos en superficie y subterráneos. En líneas generales, la instalación subterránea es ventajosa desde el punto de vista del blindaje. Sin embargo, en la parte subterránea se observó un ambiente más húmedo.

Es importante que la instalación de almacenamiento posea una licencia concedida por el órgano regulador, en caso de que no estuviese incluida ya en la licencia de explotación. La licencia podría incluir algunos requisitos específicos para esa instalación concreta.

9.3. REQUISITOS OPERACIONALES DE LAS INSTALACIONES DE ALMACENAMIENTO

Las operaciones que se llevan a cabo en una instalación de almacenamiento están limitadas a la recepción, la colocación, el control de integridad (si fuese preciso), la recuperación y la preparación para el despacho de bultos de fuentes DSRS. Las operaciones de almacenamiento son esencialmente pasivas durante el largo período en que los bultos permanecen pendientes de recuperación hasta el establecimiento del repositorio. Todas las operaciones relacionadas con el almacenamiento tienen necesariamente que llevarse a cabo de conformidad con los procedimientos autorizados por escrito.

9.3.1. Recepción y colocación

Las zonas de almacenamiento se diseñan y funcionan como zonas controladas para limitar la dispersión de contaminación y reducir al mínimo la exposición de los trabajadores a la radiación ionizante. Es necesario disponer de la ropa y el equipo de protección idóneos y que estos se lleven y utilicen según se requiera.

La recepción de fuentes DSRS debería planificarse con antelación. El explotador del almacén examina la información para confirmar que el bulto de fuentes sea aceptable para su almacenamiento; por ejemplo, que cumpla los requisitos de aceptación de desechos con fines de almacenamiento. Si no es aceptable, debería registrarse la descripción detallada y deben devolverse los documentos al remitente junto con una explicación o una solicitud de más información. En caso de haber contaminación externa, el bulto ha de ser descontaminado y comprobado nuevamente antes de ser aceptado para su almacenamiento.

El diseño de la instalación por lo general debería permitir el apilamiento, la clasificación y la inspección visual de los bultos. Tras la aceptación, el explotador del almacén ha de preparar la documentación apropiada para almacenar las fuentes. Es preciso determinar el lugar del almacén adecuado para el bulto de fuentes DSRS y registrar los detalles relativos a ese lugar. El bulto debería colocarse en el lugar designado. La segregación de las fuentes es conveniente con miras a facilitar su recuperación para un ulterior reacondicionamiento o alguna recuperación no prevista que se estime necesaria en virtud de las inspecciones periódicas por la posible degradación de los contenedores de las fuentes, o en caso de que haya categorías concretas de fuentes que, a la larga, vayan a ser colocadas en instalaciones de disposición final específicas. Los registros del inventario del almacén han de estar al día y es necesario realizar una comprobación periódica del contenido del almacén cotejándolo con los registros.

En la figura 60 se muestra un ejemplo de almacenamiento segregado.



Fig. 60. Almacenamiento segregado de desechos radiactivos, comprendidas fuentes DRSR.

9.3.2. Blindaje adicional

En el almacén se puede proporcionar un blindaje adicional al previsto en el diseño a los bultos con altas tasas de dosis en contacto y en casos de que se coloque en el almacén un gran número de bultos con bajas tasas de dosis en contacto.

9.3.3. Control de la integridad

Dado que la eficacia a largo plazo de las barreras artificiales o naturales contra la emisión de radiactividad al medio ambiente no se puede garantizar en todas las condiciones que puedan darse en el futuro, es preciso establecer un programa de monitorización de la zona de almacenamiento. Si es técnicamente viable, se ha de monitorizar entremedio de las barreras individuales (p. ej., el bulto, los límites del almacenamiento y los límites de la instalación) a fin de detectar la migración de la radiactividad mucho antes de que se disperse fuera de la instalación. En este caso es necesario tomar medidas para reducir al mínimo la contaminación dispersada. Por consiguiente, es aconsejable medir y registrar la radiación de fondo inicial de la instalación de almacenamiento antes de su puesta en servicio. La frecuencia de monitorización dependerá de la cantidad y tipo de los bultos de fuentes DRSR.

El programa de vigilancia ha de incluir la eficacia del sistema de ventilación. La monitorización radiológica y la dosimetría personal son obligatorias.

9.3.4. Recuperación y despacho

Al recibir la solicitud de recuperación de un bulto almacenado, el explotador del almacén ha de buscar en los registros del almacén la información detallada correspondiente al bulto en cuestión y pasársela a la parte apropiada. Si la información detallada está en orden, se puede aprobar la recuperación del bulto de la instalación de almacenamiento. Una vez que el explotador del almacén ha autorizado la entrega del bulto, este se recupera del almacén y se lleva a la zona de despacho. Allí, antes de ser entregado, se somete el bulto a monitorización radiológica para determinar los niveles de contaminación y radiación. La información detallada sobre el bulto se transfiere a los registros de transporte y el bulto queda disponible para su transporte de conformidad con el Reglamento de Transporte [47]. Los registros de almacenamiento de bultos han de ser modificados para registrar la fecha de despacho y la parte receptora.

9.3.5. Sistemas de seguridad física

Los sistemas de seguridad física para impedir intrusiones tienen que ser parte integrante de una instalación de almacenamiento. Un sistema de seguridad física típico incluye características para demorar el acceso, detectar el acceso no autorizado y activar una alarma y un sistema de respuesta. En la figura 61 se muestra un ejemplo de instalación de almacenamiento segura. El personal de operación velará por el servicio ininterrumpido en todas las circunstancias previsibles.



Fig. 61. Instalación de almacenamiento segura.

El acceso a las zonas de almacenamiento ha de ser controlado estrictamente para evitar que se pierdan materiales almacenados, puesto que una pérdida quizás no se detecte hasta mucho tiempo después de que se haya producido la retirada. En los almacenes, la seguridad física generalmente se obtiene mediante el cierre de los locales bajo llave. El personal con acceso autorizado ha de ser siempre el mínimo. Se pueden usar precintos para detectar cualquier acceso no autorizado. En función de la situación de seguridad física imperante han de contemplarse otras medidas de seguridad física apropiadas (como guardias, vallas de alambre de púas, cámaras de vigilancia, sistemas de alarma, etc.) y la realización periódica de un recuento de existencias. La eficacia del sistema de seguridad física ha de ser auditada y actualizada periódicamente.

9.4. EJEMPLOS DE INSTALACIONES DE ALMACENAMIENTO EN EL EMPLAZAMIENTO

Pueden preverse numerosos sistemas de almacenamiento alternativos que cumplirían los requisitos antes mencionados. Según el número de fuentes que vayan a almacenarse, las modalidades de almacenamiento pueden ir desde una caja fuerte de suelo y un armario blindado hasta un edificio previsto a tal efecto. La información aquí proporcionada ofrece solo algunos ejemplos para ilustrar las opciones de almacenamiento posibles. Quizás el usuario encuentre que una de esas opciones colma sus necesidades, pero debería hacerse hincapié en que también podrían ser adecuadas otras modalidades teniendo en cuenta las condiciones locales. De las diversas opciones adecuadas disponibles, la que ha de evaluarse es la que ofrezca la mayor eficacia en relación con el costo.

9.4.1. Cajas fuertes de suelo

Esta opción, que solo es adecuada para las fuentes más pequeñas y un número limitado de contenedores de tamaño reducido, utiliza cajas fuertes empotrables en el suelo, que se fabrican en serie, son económicas, se consiguen fácilmente y se consideran un sistema seguro. La entrada no autorizada es muy difícil. La retirada de la caja fuerte en sí es muy difícil, especialmente si se instala en los cimientos del edificio. La fotografía de la figura 62 muestra una caja fuerte de suelo típica.



Fig. 62. Caja fuerte de suelo típica.

Las cajas fuertes, cuya capacidad de almacenamiento oscila entre 30 y 60 litros, proporcionan protección contra algunos ataques físicos, como el uso de palancas, martillos de dos manos, amoladoras, taladros, sopletes de oxiacetileno y explosivos. Estas cajas fuertes pueden taparse con hormigón armado y convertirse en un sistema que proporciona almacenamiento a largo plazo con acceso restringido y que requiere una vigilancia mínima.

9.4.2. Salas a prueba de intrusión

Este sistema es apto para bultos de todos los tamaños. Una sala a prueba de intrusión normalmente se construiría con paredes de hormigón y estaría equipada con una puerta de seguridad, cerraduras de alta seguridad y detectores de movimiento. Los bultos de pequeño y mediano tamaño pueden colocarse en estanterías (figura 63), mientras que los contenedores grandes se colocan sobre el suelo (figura 64). Como medida adicional de seguridad física, en una sala a prueba de intrusión se pueden poner cajas fuertes de suelo, cada una de ellas con varios bultos pequeños en su interior. Este sistema puede proporcionar almacenamiento seguro para una gran cantidad de fuentes, ofreciendo aun así un fácil acceso cuando se requiera.



Fig. 63. Almacenamiento de fuentes DSRS en las estanterías.



Fig. 64. Almacenamiento de fuentes DSRS sobre el suelo en una sala a prueba de intrusión.

9.4.3. Depósitos y cámaras de hormigón

Para almacenar contenedores de tamaño pequeño, mediano o grande se puede utilizar un depósito o una cámara de hormigón armado, según el tamaño del depósito. Un depósito relativamente pequeño con pocos metros cúbicos de capacidad y diseñado con una tapa pesada puede servir como un sistema económico pero seguro para el almacenamiento de bultos de tamaño pequeño y mediano.

Una cámara más grande, con una tapa pesada, puede albergar bultos más grandes, así como otros de tamaño pequeño y mediano, y es útil cuando hay un gran número de fuentes que almacenar (figura 65). Si fuese preciso, esos depósitos podrían convertirse fácilmente en instalaciones de almacenamiento a largo plazo sellando la entrada con hormigón armado, y requerirían una vigilancia mínima.

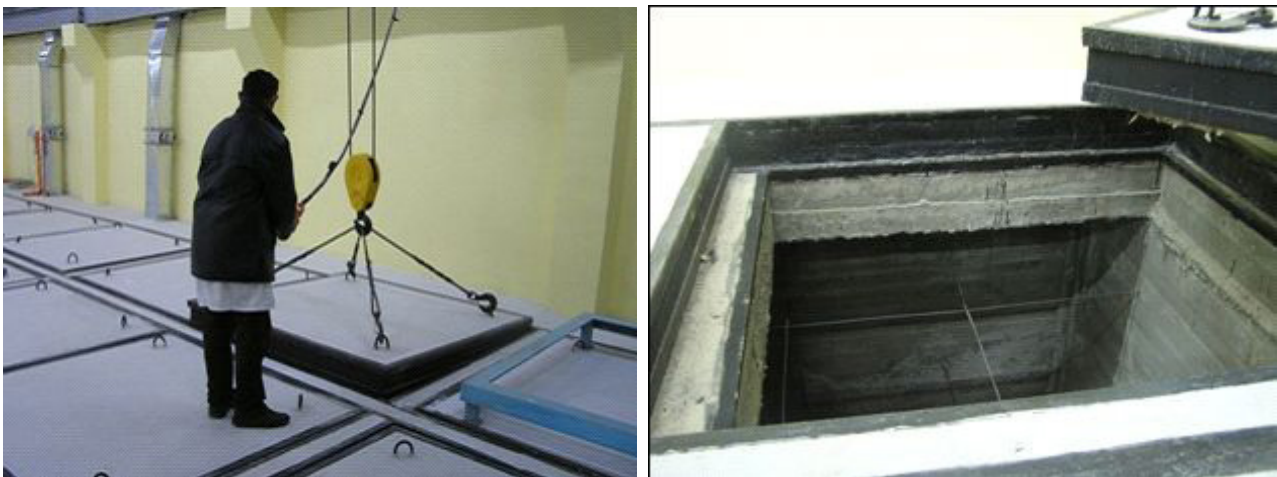


Fig. 65. Cámara de hormigón para almacenar fuentes DSRS.

9.4.4. Comparación de los sistemas de almacenamiento en el emplazamiento

En el cuadro 7 se comparan las instalaciones de almacenamiento antes descritas sobre la base de varias características [15]. Esas características representan los aspectos importantes de las diversas opciones de almacenamiento y ofrecen al usuario una forma sencilla de seleccionar la opción apropiada.

CUADRO 7. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO EN EL EMPLAZAMIENTO [15]

Tipo	Caja fuerte	Sala a prueba de intrusión	Sala a prueba de intrusión con cajas fuertes	Depósito de hormigón
Capacidad	Baja/media	Alta	Alta	Alta
Costo	Bajo	Medio	Medio	Medio
Flexibilidad (tamaño contenedor)	Limitada	Alta	Alta	Alta
Contención	Buena	Buena	Buena	Buena
Protección radiológica	Media	Buena	Buena	Buena
Seguridad física	Buena	Buena	Muy buena	Buena
Acceso	Bueno	Muy bueno	Bueno	Deficiente
Vigilancia requerida	Regular	Regular	Regular	Infrecuente

9.4.5. Problemas encontrados y enseñanzas extraídas

9.4.5.1. Almacenamiento no seguro

El almacenamiento en condiciones de falta de seguridad física puede dar lugar al acceso de personal no autorizado a las DSRS (a veces de actividad muy alta), seguido de consecuencias radiológicas potencialmente graves. En la figura 66 se muestra un ejemplo de condiciones de almacenamiento físicamente inseguras: el cabezal de una máquina de teleterapia en desuso (es decir, la fuente radiactiva) estaba accesible, oculto solo con una cubierta, en el pasillo del hospital.



Fig. 66. Ejemplo de condiciones de almacenamiento físicamente inseguras.

Se recomienda no desmantelar la fuente en el emplazamiento del usuario retirándola del portafuente, sino retirar del equipo únicamente el portafuente. Es importante que el obturador esté colocado en la posición de bloqueo. Esto, sin embargo, solo puede intentar hacerlo personal capacitado en el uso del equipo en cuestión, dado que el desmantelamiento podría comprometer la seguridad tecnológica del portafuente. El desmantelamiento de la unidad de teleterapia por parte de personal no capacitado puede dar lugar a una exposición a la radiación y a lesiones físicas (véase la figura 67).

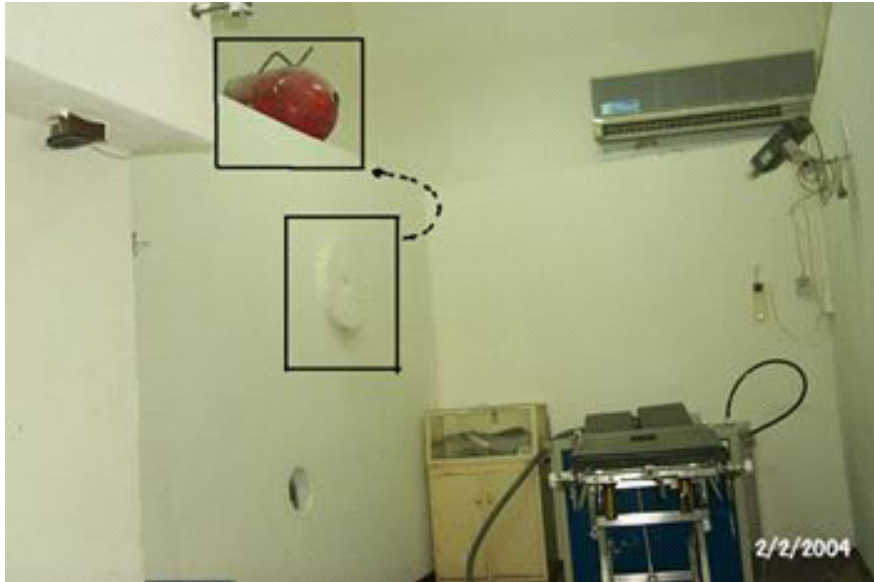


Fig. 67. Máquina de teleterapia parcialmente desmantelada (cabezal cortado con cajón en la máquina).

Dejar la fuente intacta en la instalación puede dar lugar a una situación potencialmente peligrosa. Por ejemplo, una antigua sala de radioterapia era utilizada por el personal de un hospital como vestuario y sala de almacenamiento (figura 68). Los empleados no eran conscientes de que en esa sala se había dejado almacenada una fuente radiactiva de ^{60}Co . Afortunadamente, la fuente era bastante débil, por lo que no se produjo ninguna exposición de importancia pese a que el cajón de la fuente no estaba bloqueado en posición de almacenamiento.



Fig. 68. El cajón que contiene una fuente de ^{60}Co no ha sido retirado de la máquina de teleterapia.

En algunos casos, las instalaciones de almacenamiento no cumplen los requisitos de seguridad física y, a consecuencia de ello, personas no autorizadas pueden entrar al almacén y robar las fuentes o el material de blindaje (véase la figura 69).



Fig. 69. Almacén de fuentes de radio visitado poco y sin regularidad.

9.4.5.2. Entorno de almacenamiento poco propicio

Unas condiciones ambientales de almacenamiento desfavorables, como humedad elevada y fluctuación de la temperatura, pueden provocar la degradación de la fuente o el contenedor por corrosión (véase la figura 70) y pueden dañar las etiquetas de las fuentes y los contenedores (véase la figura 71). Se debería velar por que no se pierdan los datos de las fuentes y por que, durante las operaciones de recolocación, todas las etiquetas estén protegidas y la información correspondiente quede registrada.

A partir de la experiencia también se ha visto que las condiciones de corrosión en una instalación de almacenamiento pueden ocasionar el deterioro del portafuente y el fallo del mecanismo del obturador, lo cual puede contribuir a dificultar la retirada de las fuentes.



Fig. 70. Contenedores con corrosión.



Fig. 71. Deterioro de la etiqueta del contenedor de una fuente.

9.4.5.3. Ausencia de avisos de radiación

En ocasiones, la instalación de almacenamiento no está debidamente señalizada para advertir de la existencia de peligro radiológico (véase la figura 72). Por ejemplo, las etiquetas no están escritas en el idioma local y la población local no comprende la importancia del peligro asociado. Cabe observar que, a veces, los directivos no ponen las señales de aviso en las puertas deliberadamente, al objeto de no concitar la atención de personas que no comprendan el significado de las señales o de la palabra “radiactivo” y piensen que detrás de la puerta bloqueada se guardan algunos bienes valiosos. Esto puede dar lugar a la entrada de personas no autorizadas en la instalación de almacenamiento del emplazamiento.

Otro riesgo para el personal y el público en general es que no se midan periódicamente los niveles de radiación y de contaminación.



Fig. 72. Edificio de almacenamiento sin señal ni rótulo de aviso.

9.4.5.4. Peligro de incendio

Almacenar fuentes DSRS con otros materiales no radiactivos como, por ejemplo, material inflamable, puede provocar daños o causar incendios (véase la figura 73).



Fig. 73. Almacenamiento inadecuado de fuentes DSRS.

9.5. EJEMPLOS DE INSTALACIONES DE ALMACENAMIENTO CENTRALIZADAS

Las instalaciones de almacenamiento centralizadas existentes en los Estados Miembros se clasifican principalmente en dos categorías: instalaciones superficiales e instalaciones de almacenamiento subsuperficiales (subterráneas), algunas de las cuales estaban destinadas originalmente a la disposición final de desechos. Las instalaciones de almacenamiento superficial o subsuperficial pueden ser estructuras íntegramente artificiales o parcialmente artificiales [61].

El almacenamiento *subsuperficial* es, básicamente, la colocación de los bultos de desechos en una instalación cerca de la superficie (subsuperficial) de estructura artificial que, con frecuencia, se compone de una base sólida de cemento con un material de relleno adecuado, que así y todo permite la recuperación de los desechos.

El almacenamiento *superficial* hace referencia a todo edificio o estructura en superficie destinada específicamente al almacenamiento de bultos de desechos. Los diseños de los almacenes superficiales se basan, en muchos casos, en la necesidad de manipular grandes volúmenes de bultos de desechos en bidones o cajas. Estos almacenes pueden ser desde recintos básicos hasta instalaciones con estructuras artificiales complejas con blindaje y equipo de manipulación a distancia incorporados y dotadas de ventilación, recogida de efluentes y control mediante instrumentos.

El almacenamiento abierto se utilizaba en el pasado para el almacenamiento temporal de fuentes de la categoría 1 en aquellos casos en que no se disponía de instalaciones de almacenamiento subsuperficiales o superficiales apropiadas (figura 74). La falta de protección de los bultos de desechos frente al medio ambiente y la inconveniencia de las condiciones de seguridad física hicieron que esta opción de almacenamiento fuese inadecuada e inaceptable de acuerdo con los requisitos de seguridad tecnológica y física modernos.



Fig. 74. Inadecuado almacenamiento abierto de generadores termoeléctricos de radioisótopos.

9.5.1. Almacenamiento subsuperficial

El almacenamiento subsuperficial (subterráneo) de fuentes DSRS ofrece varias opciones. Entre estas figuran el almacenamiento en seco, como los almacenes tipo pozo (figura 75), los almacenes de tubos (figura 76) o las cámaras blindadas (figura 77). Este tipo de almacenamiento proporciona una protección física muy buena y el blindaje de las DSRS almacenadas. Puede que en una instalación de almacenamiento sea necesario utilizar más de una de estas opciones con miras al almacenamiento adecuado de los tipos de fuentes en desuso que se reciban en la instalación.



Fig. 75. Preparación y carga de fuentes DSRS de ^{60}Co en una unidad de almacenamiento tipo pozo.

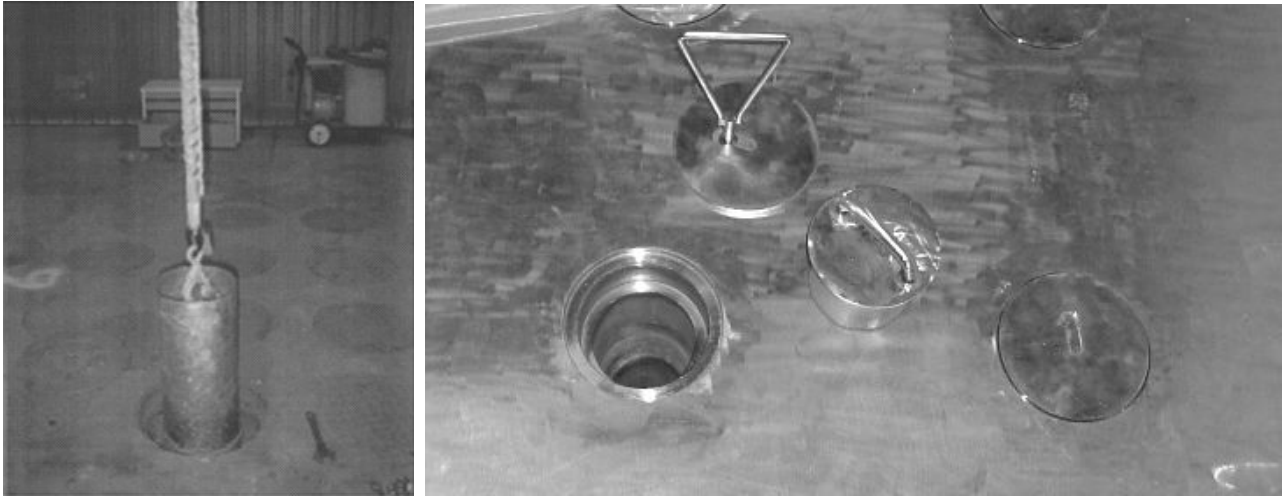


Fig. 76. Almacén de tubería para fuentes selladas.



Fig. 77. Cámaras de hormigón utilizadas para alojar cajas de hormigón.

Es probable que los contenedores de desechos, tras un período de almacenamiento provisional, sean recuperados para su ulterior acondicionamiento y reembalaje antes de la disposición final. Las cuestiones prácticas que han de tomarse en consideración al utilizar este método son las siguientes:

- la necesidad de segregar las fuentes al colocarlas en el almacén;
- los límites de generación de calor, actividad y tasa de dosis para cada uno de los contenedores y para el almacén;
- la necesidad futura de recuperar, acondicionar y transportar las fuentes consolidadas, y
- la necesidad de asegurar que el nivel máximo del agua subterránea quede por debajo de la parte inferior de la cámara.

9.5.2. Almacenamiento superficial

Las instalaciones de almacenamiento en estructuras artificiales para fuentes DSRS puede tener diseños diferentes en razón del riesgo radiológico que entrañen. Una instalación de almacenamiento de estructura artificial

para fuentes DSRS de las categorías 3 a 5 puede ser una construcción sencilla como, por ejemplo, un edificio construido sobre una base de placas de hormigón con perfiles de acero y revestimiento de hojas de metal corrugado en las paredes y el techo (figura 78). Otra posibilidad ampliamente utilizada es una construcción tipo depósito sin medios de manipulación de bultos ni calefacción o ventilación.



Fig. 78. Instalación de almacenamiento de desechos de construcción ligera.

Los almacenes de estructura artificial más sofisticados, que reúnen todas las características técnicas, son más adecuados para los períodos de almacenamiento más largos de las DSRS que presentan altas tasas de dosis en la superficie. Las instalaciones de almacenamiento pueden incluir medios de manipulación de bultos, blindaje con hormigón (o equivalente), inspección a distancia, ventilación, control de temperatura, recogida de efluentes y superficies del edificio preparadas para facilitar la descontaminación. La construcción mínima estándar para estos almacenes es un edificio tipo depósito convenientemente blindado, con un suelo sólido y las medidas de seguridad idóneas para la inspección de los bultos de desechos (figura 79).



Fig. 79. Instalación de almacenamiento de desechos de construcción robusta.

Otro tipo de almacenamiento abierto consiste en colocar las DSRS en el contenedor de mayor tamaño que, como mínimo, proporciona una mejor protección física de los bultos almacenados. En la figura 80 se muestra un ejemplo de una instalación de almacenamiento abierto sencilla (contenedor ISO de transporte y almacenamiento).



Fig. 80. Contenedores ISO de gran envergadura.

El contenedor se puede colocar en un lugar conveniente, es decir, en un emplazamiento centralizado de recogida, un pequeño centro de investigaciones nucleares, una central nuclear o una zona vigilada bajo control estatal. En el interior se pueden almacenar, según el tamaño, entre 40 y 70 contenedores de 200 litros. Más adelante, cuando se disponga de un repositorio, los contenedores se podrán transportar directamente sin necesidad de etapas de recarga adicionales.

Al final del período de almacenamiento es importante asegurar que sea posible identificar y recuperar las fuentes acondicionadas y transportarlas a la instalación de disposición final. Los bultos han de apilarse de manera sistemática para facilitar su acceso y recuperabilidad, si fuese preciso, teniendo en cuenta el uso de una carretilla elevadora o el acceso con grúa a todos los lugares, así como la capacidad de poder llegar a todos los bultos y recuperarlos.

9.5.3. Problemas encontrados y enseñanzas extraídas

9.5.3.1. Almacenamiento subsuperficial

Los pozos subterráneos (cámaras y pozos barrenados poco profundos) han estado utilizándose para almacenar fuentes DSRS en muchos Estados Miembros durante muchos años. En líneas generales, la instalación subterránea es ventajosa desde el punto de vista del blindaje y la seguridad física. Sin embargo, algunos Estados Miembros han reconsiderado esta opción de almacenamiento. Originalmente, algunas instalaciones estaban destinadas a la disposición final de fuentes DSRS y la recuperabilidad de estas no se contemplaba. El costo de la recuperación de esas fuentes en la actualidad, sumado al riesgo que entraña, ha demostrado que esta opción no es prudente, especialmente para el almacenamiento a largo plazo de fuentes DSRS (acondicionadas y no acondicionadas). El almacenamiento subsuperficial puede tomarse en consideración cuando el tiempo de almacenamiento sea muy corto y las condiciones climáticas sean favorables, es decir, en climas secos y en un lugar alejado de zonas habitadas.

9.5.3.2. Almacenamiento superficial

Lugar de la instalación de almacenamiento

Algunas instalaciones de almacenamiento estaban situadas en zonas con posible riesgo de inundación (zonas bajas). Esto provocó la degradación de los contenedores con fuentes DSRS.

En algunos casos, las instalaciones de almacenamiento han sido construidas demasiado cerca del límite del emplazamiento, lo cual restringe la tasa de dosis de las fuentes en desuso almacenadas en la instalación o exige un

blindaje adicional dentro de la instalación. También restringe la manipulación de fuentes de actividad alta en las inmediaciones de la instalación de almacenamiento. En otros casos, las instalaciones de almacenamiento quedaron situadas demasiado cerca de las fronteras nacionales debido a cambios políticos a consecuencia de los cuales se crearon nuevos estados independientes.

Además de los aspectos técnicos y políticos que deben ser estudiados al seleccionar el emplazamiento de las instalaciones de almacenamiento están las cuestiones relativas a la aceptación de dichas instalaciones por la población local. La aceptación de la instalación y de los planes juega un papel importante y puede tener una gran influencia en el ámbito técnico.

Características de diseño

Condiciones ambientales de almacenamiento

La experiencia muestra que en algunas instalaciones se podían almacenar bultos de desechos con fuentes DSRS durante decenas de años sin que se produjese degradación, pero en el mismo período de tiempo reveló que, en otras instalaciones, los bultos de desechos se deterioraban al cabo de un cierto tiempo de almacenamiento. La degradación de los bultos de desechos con el paso del tiempo es una cuestión que cobra mucha importancia, especialmente cuando se hace necesario ampliar el tiempo de almacenamiento.

La experiencia muestra que las condiciones atmosféricas dentro de la instalación de almacenamiento tienen una influencia considerable en la longevidad de los bultos. En función del clima, pueden instalarse en el interior sistemas de control de la calidad del aire. Puede instalarse equipo de refrigeración o de deshumidificación para evitar o minimizar la corrosión externa y la degradación del contenedor de desechos. En el diseño deberían tomarse en consideración no solo las condiciones existentes en una instalación que esté completamente llena, sino también las situaciones en que la instalación esté parcialmente llena: las condiciones del aire, el flujo de aire y las condiciones de humedad podrían ser muy diferentes según las condiciones de carga sean parcialmente llena o completamente llena.

Algunas veces ha habido fallos en los bultos de fuentes DSRS durante el almacenamiento debido a daños mecánicos producidos en el contenedor durante su manipulación. Los daños abarcaban desde rayaduras en la pintura, con corrosión acelerada del material del contenedor, hasta la destrucción del contenedor. Los defectos del contenedor tienden a manifestarse por sí mismos pronto, y esta es una buena razón para segregar las fuentes selladas por fecha de acondicionamiento. De este modo se pueden evitar problemas sistemáticos de integridad del contenedor. Cuanto más tiempo permanece almacenada la DSRS, mayor es la probabilidad de fallos en los bultos por influencias internas o externas.

La experiencia muestra asimismo que muchos contenedores que habían sido diseñados para transportar fuentes son inadecuados para el almacenamiento prolongado. Si el Reglamento de Transporte no es una preocupación inmediata, es decir, si se trata de un almacenamiento prolongado, entonces debería contemplarse la posibilidad de soluciones de almacenamiento alternativas y menos costosas para los contenedores.

La experiencia también muestra que el diseño de la instalación de almacenamiento debería dejar margen para la flexibilidad, modificaciones y ampliaciones, especialmente cuando no haya opciones de disposición final (comprendidos los criterios de aceptación de desechos) ultimadas y sea necesario ampliar el tiempo de almacenamiento. A este respecto, es aconsejable diseñar y construir instalaciones de almacenamiento modulares ampliables, en previsión de la ampliación que pueda ser necesaria. Esas instalaciones de almacenamiento modulares ya existen en algunos países, el Reino Unido y Eslovaquia entre ellos.

Los contenedores de fuentes más pequeños suelen apilarse para aumentar la capacidad de los edificios de almacenamiento. Las fuentes más antiguas a menudo se embalaban en contenedores no normalizados que con frecuencia no permitían su apilamiento. Es factible poner esos bultos con forma irregular en sobreembalajes normalizados (provisionales) para facilitar el apilamiento y mejorar así la eficacia del almacenamiento.

A consecuencia de distintas actividades operacionales de almacenamiento, o de la penetración de agua en las instalaciones de almacenamiento, se originaron algunas pequeñas cantidades de desechos radiactivos líquidos secundarios, generalmente de actividad muy baja. Esto confirma la necesidad de instalar un sistema apropiado para la recogida y el tratamiento de tales desechos. Del mismo modo, las actividades de monitorización (p. ej., el sondeo para detectar contaminación superficial en los bultos y en la pared interior y la base) y las actividades de

manipulación (p. ej., la ropa de protección) originan pequeñas cantidades de desechos sólidos. Las medidas para su recogida y tratamiento han de estar incluidas en el diseño.

Recuperabilidad

Incluso aunque se evalúe cuidadosamente, el fallo de bultos individuales o grupos de bultos durante el almacenamiento es algo que no puede excluirse. En los primeros tiempos de la explotación, las DSRS se colocaban en pozos barrenados o en depósitos de hormigón que posteriormente se rellenaban con arena y se cubrían con hormigón. Inspeccionar esas fuentes era simplemente imposible. Eso complicó considerablemente el proceso de recuperación de las fuentes, y la adición de arena hizo que aumentara sensiblemente el volumen de desechos radiactivos contaminados que habrá de ser necesario colocar en una instalación de disposición final. Esta práctica no se considera apropiada, ni para el almacenamiento a corto plazo ni para el almacenamiento a largo plazo.

Mantenimiento

En el pasado, la construcción de estructuras de edificios de almacenamiento falló en algunos casos. Las causas de esos fallos fueron la utilización de materiales de construcción con propiedades de envejecimiento inadecuadas, la falta de un control de calidad, un diseño erróneo de edificio estático, la subestimación de las propiedades de asentamiento de las estructuras o el suelo subterráneo, etcétera. La sustitución de las estructuras con fallos es difícil y costosa y puede requerir la retirada temporal de los contenedores de desechos a otro lugar. La experiencia muestra que, para reducir la necesidad de ese tipo de operaciones, las instalaciones de almacenamiento deben tener un diseño, unos materiales de construcción y unas técnicas constructivas de gran calidad. Durante la explotación de la instalación de almacenamiento es necesario inspeccionar rigurosamente las estructuras del edificio, y se debería medir el asentamiento de manera periódica.

Las medidas de control pueden incluir mediciones de la estructura y los cimientos e inspecciones periódicas, y es preciso planificarlas con antelación. Instalar equipo de monitorización en zonas con alta radiación es peligroso y debería proponerse en la etapa de diseño. Con frecuencia, casi todo el espacio de las instalaciones de almacenamiento está ocupado por contenedores, lo que dificulta la detección de problemas.

Otros aspectos de importancia que han de vigilarse son la operabilidad del equipo de refrigeración donde haya almacenadas fuentes generadoras de calor y la operabilidad de la instrumentación de monitorización.

Acceso al almacén y a los bultos

En algunos casos, las instalaciones de almacenamiento antiguas han sido diseñadas y construidas con el mismo acceso para el personal operativo y para los vehículos de transporte cargados con desechos radiactivos. Esto fue motivo de muchos accidentes e infringe las normas de protección radiológica. Teniendo en cuenta esta lección, la instalación de almacenamiento debería ser de fácil acceso y estar provista de doble acceso.

La instalación de almacenamiento tiene que estar diseñada para garantizar el acceso a todos los bultos de desechos. Esto es muy importante para facilitar la colocación de los contenedores, pero también para asegurar el control y la inspección periódicos de los bultos.

Comunicación

Muchas instalaciones de almacenamiento están situadas lejos de otras instalaciones nucleares en explotación y a menudo son visitadas por una sola persona, lo que pone de manifiesto la necesidad de comunicación. En el diseño de la instalación se debería asegurar un nivel adecuado de comunicación interna entre el personal que realiza los trabajos y la sala central de control.

Procedimientos operacionales

Inspección de los bultos

Aunque las prácticas del pasado no siempre han posibilitado la vigilancia periódica de los bultos de fuentes DSRS almacenados, actualmente se requieren inspecciones y la monitorización del contenido de la instalación de almacenamiento excepto que los bultos estén sujetos a un sistema de gestión integral (la anterior garantía de calidad) desde el momento de su generación.

Los contenedores deberían permitir la manipulación, monitorización, inspección y reembalaje adecuados de las fuentes. El apilamiento en modalidades, como en columnas, facilita el acceso y la facilidad de manipulación y permite la inspección. Los dispositivos de manipulación e izado requieren inspección y monitorización, ya que son tan susceptibles de sufrir corrosión como los propios contenedores de desechos. Se debe disponer de fondos y personal en cantidad suficiente para ello.

La nave de almacenamiento por lo general se llena desde atrás hacia adelante. Llegado el momento de recuperar los bultos, por un pasillo o una puerta trasera se pueden recuperar primero los contenedores más antiguos. De lo contrario, se tendría que vaciar la nave entera para llegar hasta los contenedores más antiguos.

Se ha observado que la acumulación de polvo en el interior de la instalación de almacenamiento puede complicar el acceso a los bultos y exigir operaciones de limpieza que pueden ser costosas desde el punto de vista de la protección radiológica.

Monitorización ambiental

Pese a los esfuerzos dedicados durante el diseño y la explotación para lograr que las estructuras sean a prueba de fugas y estancas, se han dado casos de entrada de agua. Se han desplegado importantes esfuerzos para determinar el origen del agua en las estructuras de almacenamiento. Se necesita un amplio programa de monitorización de las aguas subterráneas para reconocer las emisiones imprevistas de desechos recubiertos, por ejemplo, de hormigón. En otros casos se ha demostrado que las instalaciones de almacenamiento están funcionando bien al cabo de muchos decenios.

10. ACONDICIONAMIENTO

Por acondicionamiento se entienden, según el *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA* [1], las “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 [encapsulamiento] y, de ser necesario, su protección con un sobreembalaje”.

El acondicionamiento de las DSRS asegura la contención del material radiactivo, proporciona mayor confinamiento de las fuentes selladas con fugas, ofrece suficiente blindaje contra la radiación, reduce el volumen de almacenamiento y disposición final mediante la consolidación de múltiples fuentes en un único contenedor de almacenamiento y disposición final, facilita las operaciones de transporte y contribuye asimismo a la seguridad tecnológica y la seguridad física.

La capacidad de una organización de acondicionar las fuentes en desuso depende, en parte, de los parámetros de las fuentes selladas, el punto final; del proceso de acondicionamiento adoptado, y de los recursos y materiales disponibles.

10.1. EFECTOS DE LOS REQUISITOS DE ACEPTACIÓN DEL BULTO

El acondicionamiento óptimo de una fuente en desuso da como resultado un bulto que reúne todos los requisitos para su transporte, repatriación, almacenamiento y disposición final, posibilitando la manipulación de las fuentes en desuso una vez. Esos requisitos quizás se solapen, difieran o incluso no existan. En cualquier caso, el acondicionador de las fuentes debe velar por que todos los bultos que contengan las fuentes estén en plena consonancia con las mejores prácticas técnicas y la experiencia del Estado Miembro. Para decidir qué tipos de acondicionamiento se necesitan se debería consultar al órgano regulador y a las organizaciones que explotan o prevén explotar los servicios de transporte y las instalaciones de almacenamiento y de disposición final.

Los requisitos típicos de aceptación de desechos abarcan una amplia variedad de parámetros físicos, químicos y radiológicos que son esenciales para el comportamiento seguro y eficaz del bulto de desechos. En la sección 9 se presentan algunas consideraciones sobre los requisitos de aceptación de desechos para el almacenamiento de fuentes DSRS y, en la sección 12, para la disposición final. El *Reglamento de Transporte del OIEA* [47] impone un conjunto de criterios solapados para los bultos de desechos, los cuales se transportan desde el lugar de producción o uso hasta una instalación de almacenamiento, o desde una instalación de almacenamiento hasta una instalación de disposición final. Entre esos criterios figuran la tasa de dosis en la superficie, los límites de la contaminación superficial, el peso, el tamaño, la actividad total y los requisitos de integridad estructural. Habida cuenta de que algunos bultos tienen una vida de diseño limitada fuera de una instalación de disposición final, los requisitos de aceptación de desechos se consideran importantes porque garantizan que, tras el almacenamiento, el bulto de desechos todavía pueda ser recuperado y transportado de manera segura.

En condiciones de almacenamiento en espera de la disposición final, el bulto de fuentes DSRS debe mantener su integridad física y química. Puede que sea necesario retirar las fuentes en desuso de sus contenedores originales de transporte y almacenamiento y reacondicionarlas y reembalarlas para cumplir los requisitos de aceptación de desechos de una instalación de almacenamiento a largo plazo. El explotador de la instalación de almacenamiento puede negarse a aceptar bultos que no cumplan los requisitos de aceptación de desechos con arreglo a lo previsto en la licencia del explotador. En la actualidad, en la mayoría de los países los bultos de desechos para fuentes en desuso se preparan exclusivamente a efectos de almacenamiento, ya que no se dispone de una instalación de disposición final que pueda ser utilizada.

Además de los criterios de aceptación de desechos para las instalaciones de almacenamiento y de disposición final, también las posibilidades de reciclado y reutilización y de repatriación de las fuentes pueden conllevar requisitos de embalaje y certificación. Los Estados Miembros que trabajen activamente en el acondicionamiento de fuentes para su almacenamiento, tengan o no tengan definida en la actualidad una vía de disposición final, deberían asegurarse de que las medidas adoptadas en el proceso de acondicionamiento sean reversibles, según sea preciso, para cumplir futuros requisitos de embalaje. En el caso de las fuentes destinadas a su repatriación, los requisitos del Estado Miembro receptor pueden parecer demasiado restrictivos o complicados, pero su cumplimiento es indispensable para la repatriación.

10.2. ESPECIFICACIONES DE LOS BULTOS DE DESECHOS

Las especificaciones de los bultos de desechos son un conjunto de parámetros cuantitativos que es preciso satisfacer al producir un bulto de fuentes DSRS antes del almacenamiento o la disposición final [64]. Esas especificaciones están concebidas para controlar las características radiológicas, físicas y químicas del bulto que será producido, procesado o aceptado por otra organización. Las especificaciones de los desechos normalmente hacen hincapié en el comportamiento de los bultos de desechos o el control de los procesos de la instalación explotadora, y pueden utilizarse como un instrumento contractual para controlar las operaciones de acondicionamiento subcontratadas. Las especificaciones de los bultos de desechos, como los requisitos de aceptación de desechos, deberían reflejar los parámetros de la instalación de almacenamiento o disposición final prevista y las disposiciones del Reglamento de Transporte, e incorporar los parámetros pertinentes de los requisitos de aceptación de desechos o, si estos no se han elaborado, los que sean pertinentes.

Mientras que los requisitos de aceptación de desechos en general son específicos de una instalación o un emplazamiento y pueden abarcar muchos tipos de bultos diferentes, las especificaciones de los bultos de desechos son específicas para un tipo de bulto determinado y se utilizan para definir las características y atributos de un bulto de desechos. Las especificaciones definitivas de los bultos de desechos deberían estar en consonancia con los valores utilizados para las actividades en las evaluaciones de la seguridad, especialmente en las relacionadas con el almacenamiento prolongado y la disposición final.

Un posible punto débil del acondicionamiento y almacenamiento de las fuentes en desuso es la conservación de la información sobre el material radiactivo acondicionado. Es importante, por consiguiente, incluir toda la información pertinente, tanto en el exterior como en el interior del bulto, empleando el material de durabilidad adecuada disponible (acero inoxidable, aluminio, bronce o cobre, con datos perforados o grabados). Es esencial vincular los registros archivados y el bulto de desechos mediante un número de identificación exclusivo.

En las etiquetas debería constar la siguiente información:

Contenedor de encapsulamiento	Número de identificación exclusivo Isótopo Actividad Fecha de carga
Cubierta protectora provisional (si se interrumpe la operación)	Número de identificación exclusivo Etiquetas y avisos de radiación aprobados Isótopos y actividad total
Bulto de desechos	Número de identificación exclusivo Etiquetas y avisos de radiación aprobados Isótopo y actividad Fecha de acondicionamiento Tasa de dosis (en la superficie y a 1 m)

El acondicionamiento de fuentes de un nucleido por contenedor simplifica los registros y facilita las etapas de gestión subsiguientes.

10.3. REQUISITOS DE DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE ACONDICIONAMIENTO

Los requisitos para las instalaciones de acondicionamiento variarán en función del volumen y las características de las fuentes, como la naturaleza de los radionucleidos y la actividad, la composición química y la forma física de la fuente, así como su peso y dimensiones.

Las plantas de acondicionamiento pueden ser instalaciones independientes o móviles y estar adyacentes a instalaciones de almacenamiento para reducir la necesidad de transporte de los bultos entre el lugar de acondicionamiento y el de almacenamiento. En ambos casos deberían estar situadas en zonas radiológicas definidas apropiadamente.

Las instalaciones para el acondicionamiento de fuentes DSRS deberían tener capacidades técnicas suficientes para acondicionar fuentes diferentes teniendo en cuenta las incertidumbres de la disponibilidad de instalaciones de disposición final. Esas capacidades pueden incluir el equipo necesario para la caracterización de las fuentes en desuso (detectores de radiación, contadores y espectrómetros) y para el desmantelamiento de dispositivos y otras estructuras conexas, como celdas calientes. Si la actividad de las fuentes en desuso es suficientemente baja, la manipulación segura puede llevarse a cabo en una caja de manipulación con guantes o una vitrina de gases con el blindaje y los instrumentos apropiados (véase el apartado 8.2).

En el diseño de una instalación de acondicionamiento debería tomarse en debida consideración la necesidad de:

- a) protección contra la exposición a la radiación (mediante blindaje y contención);
- b) control de acceso a las zonas de acondicionamiento y almacenamiento de fuentes y control de la circulación entre las zonas de radiación y las zonas de contaminación;
- c) recuperación de los bultos almacenados;
- d) control de inventario: archivo con los diseños de fuentes y contenedores;
- e) inspección de los bultos de fuentes DSRS;
- f) manejo de los bultos de fuentes DSRS que no cumplen las especificaciones;
- g) control de efluentes líquidos y gaseosos;
- h) ventilación y filtrado de emisiones de material radiactivo a la atmósfera;
- i) trabajos de mantenimiento y, oportunamente, de clausura;
- j) protección contra incendios y prevención de explosiones;
- k) prevención de la criticidad y control de salvaguardias, y
- l) controles de seguridad física.

10.4. REQUISITOS OPERACIONALES DE LAS INSTALACIONES DE ACONDICIONAMIENTO

Acondicionar fuentes en desuso es una actividad para la cual ha de obtenerse una licencia de explotación. Como parte de la solicitud de licencia se requiere un informe de análisis de la seguridad. La licencia de explotación ha de definir el alcance de la operación de acondicionamiento, así como cualquier requisito específico que sea necesario cumplir.

Los procedimientos técnicos detallados deben cualificarse prestando atención a la capacidad acorde con la realidad de cada país. Esas cualificaciones garantizan que se puedan cumplir los requisitos de aceptación durante el diseño y la construcción de la instalación, durante el desarrollo de los procedimientos técnicos y durante el acondicionamiento propiamente dicho.

En los procedimientos operacionales relacionados con el acondicionamiento de fuentes han de contemplarse los aspectos sanitarios y de seguridad. Es importante que el proceso de acondicionamiento se planifique, prepare y documente correctamente. Las exposiciones, emisiones radiactivas y niveles de contaminación han de mantenerse por debajo de los límites autorizados. Algunas operaciones, como el desmantelamiento, el encapsulamiento, la soldadura por control remoto, los ensayos de soldadura y los ensayos de estanqueidad de las fuentes, han de llevarse a cabo en zonas controladas diseñadas a tal fin (celdas calientes, cajas de manipulación con guantes, etc.). Se pueden elaborar procedimientos alternativos, según las condiciones imperantes, pero deberían cumplir los mismos requisitos de seguridad. Todos los procedimientos han de ser sometidos a ensayo y aprobados antes de ponerlos en práctica.

Las fuentes en desuso acondicionadas deberían presentar tasas de dosis en la superficie aceptables a efectos de transporte y almacenamiento. Si la instalación o zona de operaciones de acondicionamiento está situada a cierta distancia del almacén (como suele ser el caso), la instalación ha de estar dotada del equipo de elevación, transferencia y transporte adecuado, teniendo debidamente en cuenta los requisitos de seguridad y mantenimiento.

10.5. SELECCIÓN DE UN MÉTODO DE ACONDICIONAMIENTO

10.5.1. Criterios de selección

Hay muchos factores técnicos y no técnicos que influyen en la elección de un método de acondicionamiento [52]. En la planificación de la operación de acondicionamiento de fuentes en desuso han de tenerse en cuenta los parámetros técnicos y otros factores que se enumeran a continuación:

- las características de las fuentes (tipo de radiación ionizante, actividad, período de semidesintegración, toxicidad química);
- la forma química y física del material radiactivo;
- la cantidad y el tamaño físico de las fuentes en desuso y la condición física de las fuentes;
- el cumplimiento de la reglamentación (p. ej., los requisitos de aceptación para el almacenamiento y la disposición final, los requisitos de protección radiológica y los requisitos de seguridad);
- el período de almacenamiento, las condiciones de almacenamiento y el lugar de una instalación de almacenamiento y disposición final;
- la generación de calor debida ya sea al material de la fuente o al método de acondicionamiento;
- las tecnologías de acondicionamiento probadas, y
- el costo y los recursos (equipo, personal y materiales necesarios para el acondicionamiento).

La importancia relativa de estos factores dependerá de la situación concreta del país.

10.5.2. Selección de los materiales para bultos de desechos

La selección de los materiales empleados para el acondicionamiento es muy importante ya que la cápsula de la fuente podría sufrir daños a consecuencia de condiciones ambientales externas o de un ataque químico o físico desde el interior y desde el exterior. El proceso de acondicionamiento ha de tener en cuenta los diversos problemas posibles, para reducir así al mínimo la posibilidad de fugas.

La fuente sellada y su contenedor deberían ser compatibles. Según las características de la fuente y el método de manipulación, transporte y almacenamiento, es posible que el contenedor también haya de proporcionar blindaje contra la radiación directa. Al seleccionar los materiales para el contenedor y su acabado superficial externo debería tomarse en consideración la facilidad de descontaminación. Si un contenedor no está diseñado desde el principio para satisfacer los criterios de aceptación pertinentes relativos al transporte, el almacenamiento o la disposición final, para cumplir esos criterios de aceptación se requerirá un contenedor adicional o un sobreembalaje. Debería estudiarse con especial atención la compatibilidad del bulto de fuentes DSRS y el sobreembalaje en lo que atañe a los criterios de aceptación de desechos.

Un acondicionamiento incorrecto puede dar lugar a la emisión al medio ambiente del material radiactivo de una fuente en desuso, en forma de:

- productos gaseosos (p. ej., radón);
- líquidos (soluciones acuosas, lixiviados, etc.), y
- partículas sólidas (polvo, aerosoles, etc.).

La selección del material de encapsulamiento se hace en función de la garantía que ofrezca de proporcionar una contención apropiada y eficaz del material radiactivo. Además, los materiales seleccionados para las barreras deberían ser duraderos y capaces de soportar tensiones mecánicas y otros efectos ambientales.

Por tanto, en la selección de los materiales aptos para esas barreras han de tomarse en consideración:

- la resistencia mecánica;
- la degradación del material (la vida útil de una barrera debería ser como mínimo más larga que el período de almacenamiento en la zona de almacenamiento previsto o que el período óptimo abarcado en el plan de garantía de la calidad);
- los efectos radiológicos en el material de la barrera;

- la corrosión y la piroresistencia;
- la impermeabilidad al agua y la humedad;
- los productos de desintegración radiactiva, especialmente en forma gaseosa, y
- la seguridad física de la fuente.

10.6. MÉTODOS DE ACONDICIONAMIENTO

La estrategia general de gestión de las fuentes en desuso se describe en la sección 6. Como se indica en esa sección, en caso de que no existan opciones de reciclado o reutilización o de devolución al suministrador o fabricante y haya un emplazamiento de disposición final disponible, las fuentes en desuso han de ser sometidas a disposición final de conformidad con los requisitos aplicables a los desechos radiactivos. Si ninguna de las opciones anteriores es factible, entonces es necesario tener las fuentes en desuso almacenadas hasta que haya disponible una opción de disposición final adecuada. Las DSRS deberían acondicionarse para producir un bulto que cumpla los requisitos de aceptación pertinentes.

10.6.1. Fuentes en desuso con radionucleidos de período corto

En el caso del almacenamiento en pozos o tuberías (véase el apartado 9.5.1), las DSRS con radionucleidos de período corto se insertaban en un cajón de acero inoxidable (37 mm de diámetro, 500 mm de longitud) que tenía dos tapones de blindaje apropiados en los extremos. Después se sellaba el cajón mediante el sistema de soldadura tipo TIG y se comprobaba su estanqueidad por el método de la burbuja. Para cargar el cajón en las tuberías de almacenamiento se utilizaba un contenedor de transporte blindado de carga inferior y, por control remoto, se podía manipular el cajón para bajarlo y subirlo a la posición de almacenamiento. Antes del procedimiento de carga se alinea el contenedor de transporte con la tubería, utilizando para ello un cajón simulado (figura 81). Las fuentes se conservan en un cierto número de contenedores de volumen relativamente pequeño, cada uno de los cuales contiene algunas fuentes. La recuperación de un contenedor determinado es relativamente directa.



Fig. 81. Pieza rotatoria interna de un contenedor de carga y descarga del tipo B(U).

Por lo general, un contenedor puede tener en una pieza rotatoria dos o tres cajones activos y uno simulado. La ventaja de este método es que puede utilizarse como cajón estándar de fuentes DSRS de distinto tamaño. La actividad de un cajón depende del blindaje que proporcione el contenedor de transporte. Se han diseñado instalaciones de este tipo para fuentes DSRS tanto de actividad baja como de actividad alta.

En la India, los contenedores de fuentes, diseñados para la disposición final, se colocan en pozos de tubo. Un pozo de tubo es un contenedor cilíndrico de acero revestido de hormigón con la parte superior abierta, y tiene alrededor de 4 m de profundidad. La superficie exterior se cubre con hormigón y se trata con material impermeabilizante. El espacio hueco del pozo de tubo se rellena con una lechada de cemento. La parte superior del pozo de tubo se sella con hormigón y posteriormente se impermeabiliza. En la figura 82 se muestra el esquema de un pozo de tubo típico.

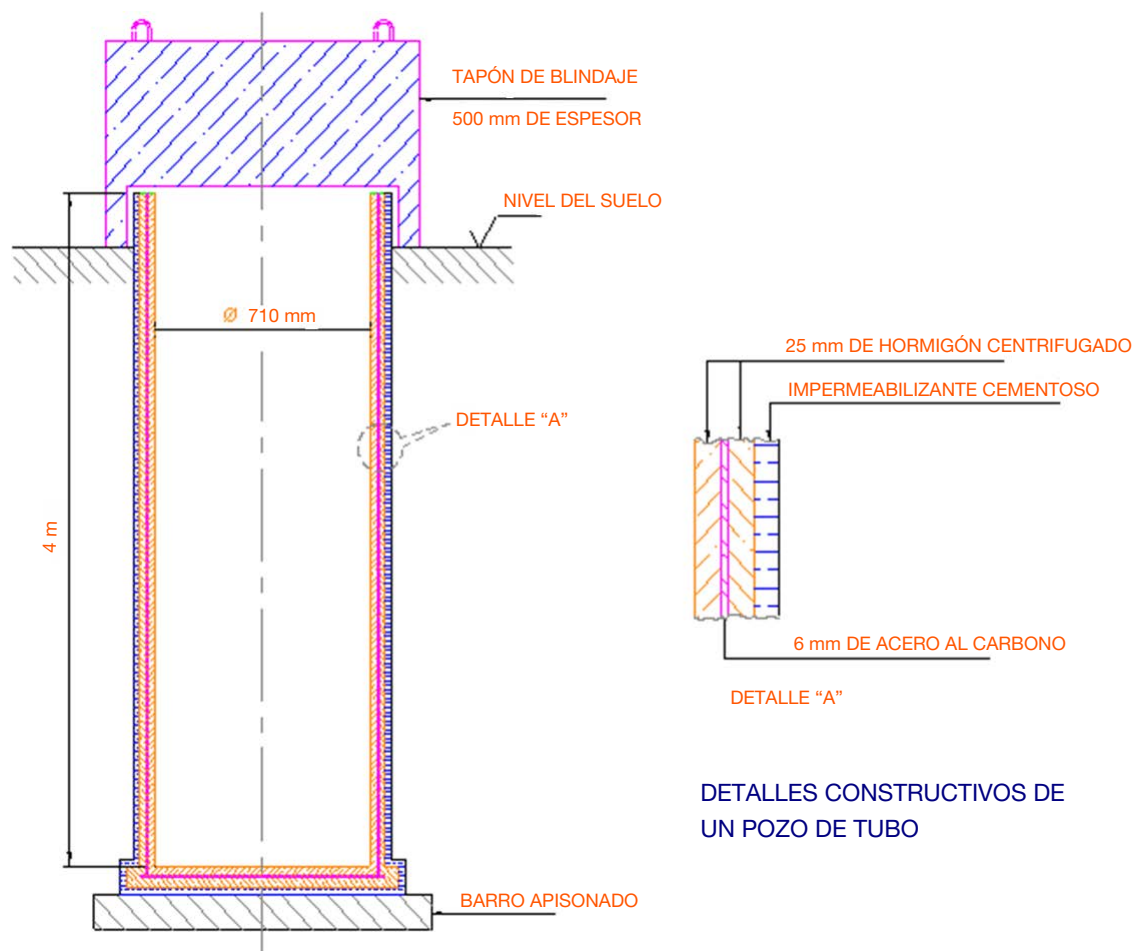


Fig. 82. Esquema de un pozo de tubo típico.

10.6.2. Fuentes en desuso con radionucleidos de período largo

Los radioisótopos de período largo más comunes que pueden contener las fuentes radiactivas selladas (fuentes DSRS de período largo) son ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{237}Np , ^{241}Am , ^{226}Ra (emisores alfa) y ^{14}C y ^{63}Ni (emisores beta). Los detectores de humo, los pararrayos y los eliminadores de electricidad estática constituyen ejemplos de fuentes DSRS de período largo, las cuales pueden manipularse sin blindaje. Por el contrario, para manipular de manera segura las fuentes de braquiterapia de ^{226}Ra y ^{137}Cs se requieren barreras de plomo.

10.6.2.1. Fuentes DSRS de período largo de radio y otras

Existe un método de probada eficacia para acondicionar fuentes de braquiterapia de radio (figuras 83-86) y otras fuentes en desuso de período largo con fines de almacenamiento, que consiste en encapsularlas (para facilitar su recuperación del almacenamiento a efectos de la disposición final en un repositorio geológico), poner las cápsulas soldadas dentro de un contenedor de plomo que sirva de blindaje (en el caso de un almacenamiento a largo plazo seguido de transporte) y colocar el contenedor en un bidón de acero suave de 200 litros con revestimiento de hormigón [16, 18]. El hormigón se usa fundamentalmente para la protección y seguridad física de las fuentes. Un bulto de ese tipo normalmente pesa alrededor de 350 kg como mínimo y para su manipulación y transporte se requiere equipo mecánico como, por ejemplo, una carretilla de horquilla elevadora. Esta forma de acondicionamiento proporciona una barrera contra la pérdida de contención de los materiales radiactivos y, por el volumen, peso y solidez del bulto, impide la retirada no autorizada de la fuente.



Fig. 83. Típicas cápsulas de acero inoxidable.



Fig. 84. Encapsulamiento de fuentes de radio.



Fig. 85. Escudos de plomo para el almacenamiento a largo plazo.



Fig. 86. Bulto de radio antes de ser cerrado.

La cápsula que se emplea para el encapsulamiento de fuentes de período largo es un tubo de acero inoxidable que en uno de los extremos tiene una tapa soldada (figura 83). Las cápsulas han de prepararse de esta manera con antelación a fin de tener una cantidad suficiente de ellas y poder encapsular todas las fuentes de que se disponga. Una vez colocada la fuente dentro de la cápsula de acero inoxidable se suelda la segunda tapa en el otro extremo.

En la Federación de Rusia y en algunos países de la antigua Unión Soviética y de Europa Oriental se han desarrollado y se utilizan algunos métodos ligeramente diferentes y específicos para el acondicionamiento de fuentes de radio y otras fuentes de período largo [65].

Toda la información pertinente sobre el inventario acondicionado —radioisótopo, fecha de acondicionamiento, número de cápsulas, actividad total, etcétera— ha de registrarse en distintos medios (p. ej., en copia impresa, en ficheros electrónicos y en placas metálicas grabadas fijadas a los bultos) y estar en poder de la autoridad competente.

10.6.2.2. Detectores de humo

Los detectores de humo constituyen un caso especial en esta categoría, puesto que las unidades en sí suelen estar exentas de control reglamentario y, en consecuencia, la disposición final en vertederos generales está permitida para fuentes individuales. No obstante, debido a la gran cantidad de estos dispositivos que hay distribuidos por cada

país y el largo período de semidesintegración de las fuentes, una práctica que cada vez se prefiere más consiste en recoger, retirar (figura 87) y consolidar las fuentes para su acondicionamiento y posterior almacenamiento a largo plazo [18].



Fig. 87. Centenares de fuentes retiradas de detectores de humo.

Una opción de acondicionamiento adecuada para las fuentes recogidas puede ser colocarlas en botes de acero inoxidable y después soldarlos. En muchos países, la concentración de emisores alfa en cada bulto de desechos radiactivos que se someta a disposición final en un repositorio cerca de la superficie está limitada a 4000 Bq/g [66]. Soldar el acero inoxidable puede ser el método preferido para retrasar o eliminar la posibilidad de emisión de radón u otros productos descendientes desde el contenedor almacenado, pero las futuras instalaciones de disposición final o de almacenamiento podrían requerir la verificación visual de la identidad de cada fuente antes de su expedición, por lo cual deberían estudiarse otras maneras de cerrar el contenedor externo. En un Estado Miembro, las láminas de ^{241}Am retiradas de los detectores de humo se han colocado en botes similares a los de pintura, los cuales se han cargado luego en el bidón de 200 litros estándar para el almacenamiento en espera de la disposición final.

10.6.2.3. Pararrayos

Los pararrayos normalmente son de gran tamaño y en el interior del dispositivo hay una pequeña fuente sellada. Es factible dismantelar el pararrayos y retirar de él la fuente (figuras 41, 88). El procedimiento de dismantelamiento depende fundamentalmente del nivel de contaminación de las distintas piezas del dispositivo y de la viabilidad técnica de retirar las piezas radiactivas (láminas o pastillas) sin originar desechos secundarios. A fin de evitar la contaminación del medio ambiente, la bolsa plástica cerrada con todo su contenido (piezas del dispositivo, fuentes, artículos fungibles, etc.) se transfiere a una caja de manipulación con guantes. La bolsa se abre después de cerrar la caja de manipulación con guantes.

Las fuentes (láminas, flejes o discos cerámicos) retiradas del cuerpo del pararrayos pueden soldarse en cápsulas inoxidables de la manera descrita anteriormente para el radio.



Fig. 88. Placas de ^{226}Ra y ^{241}Am retiradas de pararrayos.

10.6.3. Fuentes de neutrones

La principal diferencia en el acondicionamiento de las fuentes de neutrones es la necesidad de atenuadores que reduzcan las tasas de dosis de neutrones además de la dosis gamma. En la práctica, las fuentes de neutrones, comprendidas las de Am-Be, Ra-Be y Pu-Be, normalmente se ponen en cápsulas especiales, del modo descrito anteriormente, y después se colocan en sobreembalajes de tubo S100 o S300, que se describen más adelante. Es importante recordar que no todas las fuentes de neutrones utilizan berilio como emisor de neutrones. Aunque el berilio es el elemento más común utilizado en combinación con el nucleido emisor alfa, se han empleado otros elementos, como el litio, el boro, el flúor y otros. También el californio 252 se ha utilizado en fuentes de neutrones. Este nucleido, que se desintegra por fisión espontánea, tiene una tasa de emisión de neutrones mucho más alta que cualquiera de las fuentes de neutrones que emplean reacciones alfa-neutrón para la emisión de neutrones.

En el caso de las fuentes de neutrones contenidas en un dispositivo, la retirada de la fuente de neutrones debería llevarse a cabo siguiendo las instrucciones del fabricante del dispositivo o las instrucciones para el usuario. Si no se dispone de las instrucciones, los dispositivos pueden embalsarse para su transporte intactos, o ha de seleccionarse un método de preparación u obtención de los procedimientos de desmantelamiento. En ningún caso deberían retirarse las fuentes de los dispositivos sin instrucciones o procedimientos específicos del fabricante del dispositivo u otra fuente autorizada.

Las fuentes de neutrones pueden acondicionarse utilizando un sobreembalaje de tubo modelo S300 o S100. Este es un contenedor aceptado para la disposición final en una instalación de disposición final en funcionamiento que acepta fuentes de neutrones y, además, está certificado para su uso como contenedor de transporte de conformidad con el Reglamento de Transporte del OIEA.

El sobreembalaje de tubo utiliza un blindaje neutrónico de polietileno de alta densidad en el interior de un tubo de acero inoxidable, lo que reduce las tasas de dosis equivalente de neutrones externa por unidad de actividad en el contenedor. Esto permite cargar contenido de actividad más alta sin dejar de cumplir las limitaciones de la tasa de dosis externa aplicables tanto al embalaje como a la disposición final. Este contenedor está disponible en el mercado y tiene certificado internacional de bulto del Tipo A.

El sobreembalaje S300 se compone de un tubo de 30 cm de diámetro colocado en el interior de un bidón de 200 litros con relleno de fibra vulcanizada y contrachapado y materiales de blindaje neutrónico interno. El tubo tiene una altura total de 70 cm y un diámetro exterior de 32 cm. El tubo sobreembalado en un bidón de 200 litros pesa 195 kg. El cuerpo, la tapa y la brida para pernos están construidos en acero inoxidable. Para cerrar el tubo se necesita una junta tórica de caucho butílico o de etileno-propileno.

El sobreembalaje S100 (figura 89) se compone de un tubo de 15 cm de diámetro colocado en el interior de un bidón de 200 litros con materiales de blindaje neutrónico interno. El tubo tiene una altura total de 70 cm y un diámetro exterior de 17 cm. El tubo sobreembalado en un bidón de 200 litros pesa 220 kg. El cuerpo, la tapa y la brida para pernos están construidos en acero inoxidable.



Fig. 89. Sobreembalaje de tubo S100.

A través del Departamento de Energía de los Estados Unidos puede obtenerse información detallada sobre el comportamiento y la adquisición.

10.6.4. Fuentes de actividad alta en desuso

Para el acondicionamiento de las fuentes de actividad alta en desuso no hay muchas opciones [16]. La manipulación y el acondicionamiento de estas fuentes requiere celdas calientes y manipuladores a distancia/esclavos; no es factible retirar las fuentes de los dispositivos.

10.6.4.1. Retirada del portafuente del equipo

Esta opción se considera una medida provisional o una medida que solo ha de adoptarse en circunstancias especiales. Por ejemplo, si no se dispone de una instalación blindada en la que retirar las fuentes de los portafuentes y el portafuente es demasiado grande como para ponerlo en un contenedor adecuado, puede que no haya otra posibilidad más que aplicar esta opción. En ese caso, el acondicionamiento se limita a retirar el portafuente (cabezal de teleterapia, irradiador de investigación, etc.) del equipo y a transportarlo seguidamente a la instalación de almacenamiento. Numerosos cabezales de teleterapia e irradiadores de investigación han sido acondicionados de esta manera debido a sus características constructivas y las de las fuentes. Todos los dispositivos y portafuentes deberían ser marcados, etiquetados y controlados para garantizar su almacenamiento en condiciones de seguridad tecnológica y física.

10.6.4.2. Embalaje del portafuente en el contenedor de almacenamiento

La utilización de bidones con revestimiento de hormigón o de cajas de acero u hormigón para acondicionar fuentes de actividad alta en sus portafuentes es una práctica común. El portafuente puede colocarse en un contenedor estándar (figura 90). Habitualmente se coloca un bidón de 100 litros dentro de uno de 200 litros utilizando hormigón; o, para piezas más grandes, se pueden encementar bidones de 200 litros en sobreembalajes de mayor tamaño. Las cajas de hormigón o acero tienen ventajas respecto de los bidones en el sentido de que pueden apilarse más fácilmente y su volumen y capacidad de carga son mucho mayores (figura 91).



Fig. 90. Cabezal de teleterapia antes de ser acondicionado en el interior de un bidón metálico.



Fig. 91. Unidades de teleterapia antes y después de ser acondicionadas en el interior de cajas metálicas.

El portafuente, para asegurar que pueda así ser recuperado para su reacondicionamiento y futura disposición final, se coloca dentro del contenedor en un “vacío”, pero no sepultado en hormigón sólido. Este método proporciona un blindaje suficiente, sujeta el peso del bulto, reduce la posibilidad de una retirada no autorizada y, además, permite la retirada del portafuente sin necesidad de picar el hormigón vertido cuando existan vías adicionales de disposición final.

10.6.4.3. Embalaje de la fuente retirada del portafuente

La fuente se puede retirar del portafuente y colocar en un contenedor adecuado. La retirada de la fuente del portafuente se lleva a cabo en una celda caliente debidamente equipada (p. ej., con manipuladores maestro-esclavo).

La operación de desmantelamiento reducirá el volumen a los efectos tanto del almacenamiento como de la posterior disposición final. Esta es una opción ventajosa cuando el inventario de fuentes es grande. El diseño del contenedor de almacenamiento debe determinarse en función de las características de la fuente y los requisitos de transporte. La celda caliente ha de tener una puerta blindada suficientemente grande como para poder introducir en ella un contenedor de almacenamiento blindado. Antes de introducir la fuente se ha de comprobar que no haya contaminación en la celda caliente. Se requiere equipo de izado en la celda caliente, especialmente para desmantelar los portafuentes más antiguos, de los que no estaba previsto retirar las fuentes.

Se debería comprobar la contaminación en el portafuente vacío y, si no presenta contaminación, puede ser reutilizado, reciclado o sometido a disposición final. Si el portafuente presenta contaminación, tiene que ser descontaminado hasta que alcance niveles aceptables. Los portafuentes fabricados con uranio empobrecido requieren especial consideración.

Un contenedor de almacenamiento blindado puede estar diseñado para alojar varias fuentes en desuso. Una vez lleno, el contenedor puede colocarse en un bidón con revestimiento de hormigón similar al descrito anteriormente para la opción de encapsulamiento, que proporcionará algo más de blindaje. Otra posibilidad es que un contenedor de almacenamiento sin blindaje esté diseñado para alojar varias fuentes que pueden someterse a almacenamiento blindado (p. ej., un almacén tipo pozo).

Todas las fuentes de actividad alta que sean almacenadas, independientemente de que lo sean en configuraciones con blindaje o sin blindaje, deberían estar protegidas para impedir que un intruso pueda retirar las fuentes de los contenedores o retirar el contenedor entero del lugar de almacenamiento blindado.

10.7. LA INSTALACIÓN DE CELDA CALIENTE MÓVIL DEL OIEA

El OIEA ha desarrollado y mantiene una instalación de celda caliente móvil (figuras 92-94) para el acondicionamiento de fuentes selladas de actividad alta en desuso. Desde 2004, el OIEA viene prestando asistencia a los Estados Miembros de África y América Latina para retirar las fuentes de los cabezales de teleterapia de uso médico y de los irradiadores, y para retirar fuentes aisladas de diversas configuraciones blindadas.

Las capacidades de diseño incluyen la transferencia de las fuentes a un contenedor de almacenamiento blindado o a contenedores de transporte, según proceda, para mover el inventario de fuentes a almacenamiento nacional, repatriación o disposición final. La instalación de celda caliente se transporta en dos contenedores ISO e incluye todos los instrumentos, piezas de equipo y materiales que se prevé usar en la misión de recuperación, y solo requiere el suministro de electricidad, mano de obra local y arena proveniente de fuentes locales para el blindaje.



Fig. 92. La instalación de celda caliente móvil del OIEA, completamente montada y lista para su uso.

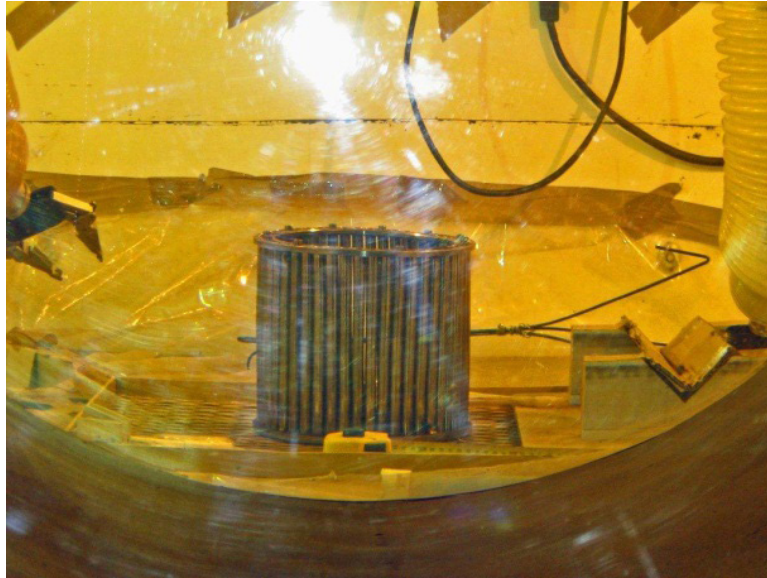


Fig. 93. Cesta de la fuente de un irradiador de investigación vista a través de la ventana de la instalación de celda caliente móvil del OIEA.



Fig. 94. Cofre blindado de almacenamiento a largo plazo completamente fijado a la escotilla de transferencia de la instalación de celda caliente móvil del OIEA.

El uso de esta capacidad está restringido, por razones de tiempo, trabajo y gasto, a aplicaciones en emplazamientos en los que haya muchas fuentes de actividad alta, no existan medios adecuados de manipulación a distancia y la disponibilidad de instalaciones de almacenamiento protegidas sea limitada o nula. Una vez se selecciona como método óptimo para acondicionar un inventario dado, el OIEA concierta contratos con el Estado Miembro y el contratista de este a fin de planificar y ejecutar las operaciones de acondicionamiento. El contratista transporta luego la instalación de celda caliente móvil y los contenedores apropiados hasta el emplazamiento seleccionado por el Estado Miembro, viaja al emplazamiento y monta la instalación de celda caliente móvil empleando para ello mano de obra y materiales locales en la mayor medida posible, y acondiciona las fuentes de los dispositivos reunidos en el emplazamiento de trabajo. Una vez concluida la misión, óptimamente el Estado Miembro quedaría sin ninguna de las fuentes, pero en realidad es más probable que el Estado Miembro asuma la

responsabilidad de guardar el contenedor de almacenamiento a largo plazo en el almacén nacional que contiene el inventario restante de las fuentes que no hayan podido ser transportadas para someterlas a disposición a largo plazo, como a la disposición final o la repatriación.

El cofre blindado de almacenamiento a largo plazo es conceptualmente similar a muchos “cofres de transferencia” que se utilizan en la industria para transportar fuentes nuevas con que recargar los cabezales de teleterapia. Posee capacidad para recibir cuatro cajones de fuentes individuales, cada uno de los cuales puede contener varias fuentes de cabezales de teleterapia o de irradiadores. Según el diseño inicial y el análisis de la seguridad, el cofre blindado de almacenamiento a largo plazo tiene hipotéticamente una capacidad de 370 GBq (10 000 Ci) de ^{60}Co . Se puede utilizar como cofre de transferencia para almacenar fuentes o puede transportarse en un sobreembalaje certificado que cumpla los requisitos de los bultos del Tipo B.

El OIEA prosigue, conjuntamente con los Estados Miembros, en sus esfuerzos encaminados a perfeccionar las capacidades de transporte del cofre blindado de almacenamiento a largo plazo con miras a certificar un contenedor del Tipo B para transportarlo.

10.8. ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS

10.8.1. Fuentes de período corto

En el pasado, empotrar las fuentes en hormigón, es decir, encerrarlas en un bulto del Tipo A, era una práctica frecuente [15]. La fuente con su blindaje se colocaba en el centro de un bidón de acero dulce de 200 litros con revestimiento de hormigón y barras soldadas, que se rellenaba con mortero de cemento y se cerraba con una tapa. En la actualidad se considera que ese método no es práctico ni económico. A falta de una vía de disposición final y sin disponer de requisitos de aceptación de desechos para la disposición final, puede ser preciso reacondicionar la fuente, lo que va unido a la necesidad de recuperar la fuente del hormigón. Esa operación sería costosa e insegura. Si los futuros requisitos para la disposición final permitiesen someter el bulto a disposición final tal como esté, el costo de la disposición final sería más elevado, habida cuenta del tamaño y el peso de los bultos. Por ello es muy importante disponer de la información original sobre la fuente acondicionada, así como de los procedimientos técnicos empleados en el proceso de acondicionamiento. Existe una clara tendencia a utilizar en el acondicionamiento métodos que sean tanto reversibles como prácticos.

10.8.2. Fuentes de período largo

El acondicionamiento de fuentes de Ra, Am, Am-Be, Ra-Be y otras fuentes de período largo en desuso a efectos de su almacenamiento incluye etapas de encapsulamiento de las fuentes en cápsulas de acero inoxidable. Este método proporciona un volumen pequeño de fuentes encapsuladas y facilita la recuperación de esas cápsulas de los bultos para su disposición final en repositorios geológicos profundos. En el caso de las fuentes de Ra, tiene que hacerse el ensayo de estanqueidad del encapsulamiento. Los métodos adecuados para hacer el ensayo de estanqueidad se describen en la Norma ISO 9978 [22]. El ensayo de burbuja en vacío es el método preferido.

En el pasado, algunos fabricantes usaban ampollas de vidrio o cuarzo para encapsular el radio [18]. La probabilidad de que se produzcan fugas de gas radón en esas ampollas es mayor que en el caso de las cápsulas de acero inoxidable soldadas. A fin de reducir ese riesgo y proteger las ampollas contra las tensiones mecánicas y otros efectos ambientales se requiere un encapsulamiento adicional de las ampollas en contenedores de acero o bronce.

Para el acondicionamiento de otras DSRS de período largo, como las de $^{226}\text{Ra-Be}$, $^{241}\text{Am-Be}$ y ^{252}Cf que emitan radiación neutrónica, el diseño del blindaje del bulto preparado para su almacenamiento debería incluir materiales hidrogenados (p. ej., polietileno de alta densidad, cera).

10.8.3. Fuentes de actividad alta

Las operaciones relacionadas con la retirada de una fuente de actividad alta (categorías 1 y 2) del portafuente, su colocación en otro contenedor y algunas otras operaciones necesarias durante el acondicionamiento de las fuentes de actividad alta requieren una celda caliente y personal muy cualificado. En muchos Estados Miembros con aplicaciones nucleares limitadas, la falta de contenedores aprobados, de celdas calientes y de mano de obra

dificulta o hace imposible el acondicionamiento de esas fuentes. En la práctica, ningún país somete efectivamente a disposición final fuentes de actividad alta, debido a la falta de un repositorio geológico. Eso significa que el acondicionamiento de dichas fuentes se limita a su preparación para el almacenamiento a largo plazo solamente [17].

En estas circunstancias, la única manera posible de resolver esos problemas es recibir asistencia internacional, por ejemplo, del OIEA, que presta servicios de acondicionamiento y repatriación de fuentes de actividad alta desde cada país (véase el apartado 10.7).

En la Federación de Rusia se ha desarrollado una técnica especial de acondicionamiento *in situ* para aumentar la seguridad del almacenamiento a largo plazo de fuentes de actividad alta desnudas retiradas de dispositivos y transferidas a contenedores de acero inoxidable almacenados en pozos barrenados poco profundos ubicados en repositorios tipo RADON. La técnica comporta el llenado gradual del contenedor de almacenamiento con una aleación de metales de bajo punto de fusión [67].

11. TRANSPORTE

El método por el cual una fuente en desuso se transporta desde los locales del usuario hasta una instalación central o regional de almacenamiento o disposición final depende, entre otros factores, de las condiciones físicas, el tipo y la actividad de la fuente; el tipo de dispositivo; la disponibilidad de bultos de transporte adecuados; la capacidad de manipulación de la instalación receptora y los requisitos de acondicionamiento y almacenamiento.

11.1. REGLAMENTO DE TRANSPORTE

Todo transporte de material radiactivo por vías públicas ha de llevarse a cabo de conformidad con el reglamento de transporte nacional aplicable. Los Estados Miembros por lo general se rigen por el *Reglamento de Transporte del OIEA* [47]. Antes de transportar realmente las fuentes se consulta al órgano regulador. En caso de que no haya en el país una autoridad establecida con los conocimientos especializados suficientes, se puede solicitar la asistencia del OIEA.

Si la fuente contiene una actividad inferior a los valores A_1/A_2 , según se establece en el *Reglamento de Transporte del OIEA* [47], puede transportarse en un bulto de transporte del Tipo A. El bulto del Tipo A puede ser una caja, un bidón o un receptáculo similar, o incluso una cisterna, un contenedor o un recipiente intermedio para graneles que contenga una actividad no superior a A_2 o no superior a A_1 si el contenido responde a la definición técnica de “material radiactivo en forma especial”:

“Por materiales radiactivos en forma especial se entenderá o bien un material radiactivo sólido no dispersable o bien una cápsula sellada que contenga materiales radiactivos”.

El valor aplicable a los “materiales radiactivos en forma especial” es A_1 (el valor A_2 se aplica si no están en forma especial). Por ejemplo, para algunos isótopos típicos esos valores son los siguientes⁸:

— Cobalto (⁶⁰ Co):	$A_1 = A_2 = 0,4 \text{ TBq} (\sim 11 \text{ Ci});$	
— Cesio (¹³⁷ Cs) ⁹ :	$A_1 = 2 \text{ TBq} (\sim 54 \text{ Ci}),$	$A_2 = 0,6 \text{ TBq} (\sim 16 \text{ Ci});$
— Iridio (¹⁹² Ir):	$A_1 = 1 \text{ TBq} (\sim 27 \text{ Ci}),$	$A_2 = 0,5 \text{ TBq} (\sim 14 \text{ Ci});$
— Estroncio (⁹⁰ Sr):	$A_1 = 0,2 \text{ TBq} (\sim 5,6 \text{ Ci}),$	$A_2 = 0,1 \text{ TBq} (\sim 2,7 \text{ Ci});$
— Americio (²⁴¹ Am):	$A_1 = 10 \text{ TBq} (\sim 270 \text{ Ci}),$	$A_2 = 1 \times 10^{-3} \text{ TBq} (\sim 2,7 \times 10^{-2} \text{ Ci});$
— Californio (²⁵² Cf):	$A_1 = 0,05 \text{ TBq} (\sim 1,4 \text{ Ci}),$	$A_2 = 3 \times 10^{-3} \text{ TBq} (\sim 8 \times 10^{-2} \text{ Ci}).$

Cabe esperar que muchas fuentes cumplan los requisitos para su clasificación como “material radiactivo en forma especial”, en particular las fuentes fabricadas de acuerdo con las normas actuales. Entre esos requisitos figuran límites dimensionales, un ensayo de impacto, un ensayo de percusión, un ensayo de flexión y un ensayo térmico. Más allá de las características técnicas, “material radiactivo en forma especial” es una categoría jurídica que influye en la selección de una opción de transporte. Una fuente solo puede ser considerada como “material radiactivo en forma especial” si dispone de un “certificado de material radiactivo en forma especial” válido.

Si la cantidad de actividad contenida en el bulto sobrepasa los valores A_1 o A_2 , se requiere un bulto del Tipo B. Las especificaciones detalladas de los ensayos y demás criterios para un bulto de transporte del Tipo A o del Tipo B pueden consultarse en el *Reglamento de Transporte del OIEA* ([47]).

Los bultos del Tipo A o del Tipo B deben estar marcados de manera legible y duradera en el exterior y tener fijada una etiqueta con la categoría apropiada. Las etiquetas con la categoría (que llevan el símbolo de radiación ionizante) se fijan en dos lados opuestos del bulto y quedan claramente visibles y libres de obstrucciones (figura 59). Las señales de advertencia en las marcas y etiquetas de transporte han de estar en el idioma que exija el reglamento nacional de transporte, según proceda. Los vehículos rodados, así como los contenedores grandes, llevan rótulos con las señales de advertencia apropiadas fijados a ambos laterales y en cada parte trasera (figura 95):

⁸ Los valores expresados en curios son aproximados y se citan aquí para quienes están más familiarizados con ellos.

⁹ Los valores A_1 y A_2 incluyen la contribución de los nucleidos descendientes con periodo de desintegración inferior a 10 días.

“Las [fuentes en desuso] para las que no sea posible satisfacer los demás requisitos del [Reglamento de Transporte] se transportarán exclusivamente en virtud de *arreglos especiales*. Siempre que la autoridad competente haya comprobado que no es posible satisfacer las demás disposiciones del presente Reglamento y se haya demostrado el cumplimiento de las normas obligatorias de seguridad establecidas por el presente Reglamento por medios distintos a las demás disposiciones [...], la autoridad competente *podrá aprobar* arreglos especiales para *operaciones de transporte de una única remesa o de una serie planificada de remesas múltiples*. El grado global de seguridad durante el transporte deberá *equivaler, cuando menos, al que se alcanzaría de cumplirse todos los requisitos reglamentarios aplicables [...]*. Las remesas de este tipo requerirán aprobación multilateral” [47].



Fig. 95. Rotulación de vehículos utilizados para transportar fuentes radiactivas selladas.

11.2. OPCIONES DE TRANSPORTE

Hay dos opciones posibles para el transporte de fuentes en desuso, a saber, transportar la fuente en su portafuente original y transportarla habiéndola retirado antes del portafuente (figura 96).

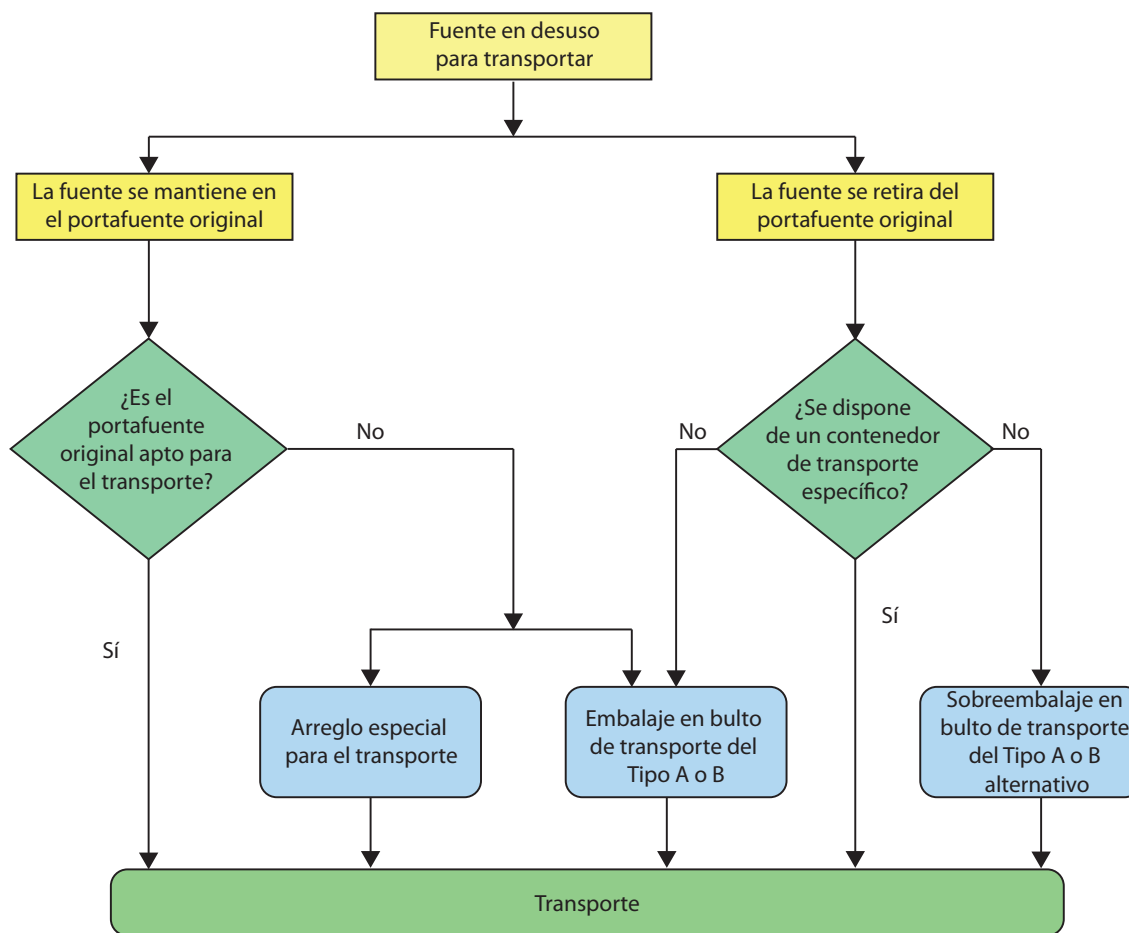


Fig. 96. Opciones posibles para el transporte de fuentes selladas en desuso.

En los subapartados siguientes se analizan las distintas posibilidades para el transporte de fuentes en desuso. Aunque en los subapartados siguientes se analizan con cierto detalle las distintas opciones, el requisito previo de la aprobación reglamentaria de la opción u opciones que seleccione el usuario se mantiene.

11.2.1. La fuente se mantiene en el portafuente original

En esta situación hay dos opciones posibles.

11.2.1.1. Transporte en el portafuente original

En algunos casos, el portafuente puede estar calificado como bulto de transporte del Tipo A o del Tipo B, siempre que cumpla la reglamentación vigente en materia de transporte. Este método es indudablemente seguro, conveniente y eficaz en relación con el costo para el usuario, dado que reduce al mínimo la dosis de radiación durante la manipulación y evita la necesidad de un bulto de transporte. La minimización de la dosis de radiación también puede ser conveniente desde el punto de vista de la instalación receptora, en tanto y en cuanto los criterios de aceptación de desechos de la instalación de disposición final no requieran la retirada de la fuente de su portafuente. Aun cuando sea necesario retirar la fuente del portafuente antes de someterla a almacenamiento a largo plazo o a disposición final, es probable que la instalación receptora esté mejor equipada para llevar a cabo esta operación que el usuario. En la figura 97 se muestran ejemplos de portafuentes originales de fuentes radiactivas usados como bulto de transporte.

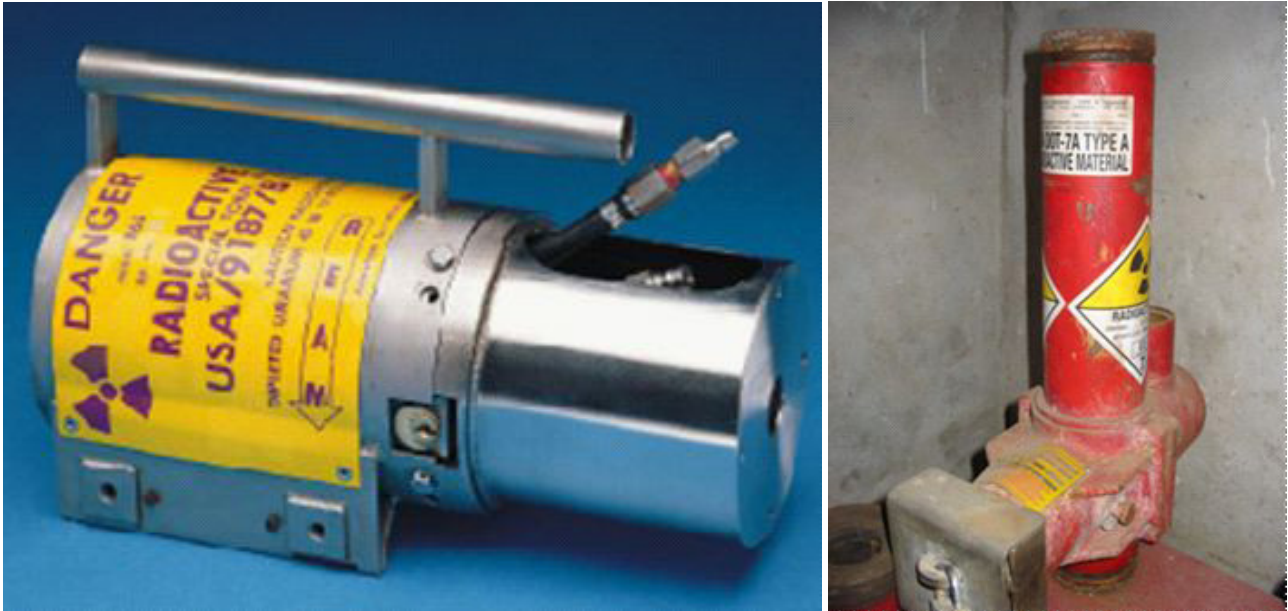


Fig. 97. Ejemplos de portafuentes originales de fuentes radiactivas usados como bulto de transporte.

Si el portafuente original no está calificado como bulto de transporte y es necesario transportarlo, se podría conceder la aprobación en virtud de las condiciones de un arreglo especial. Como alternativa al certificado de arreglo especial, la autoridad competente en cuestión ha de estudiar la posibilidad de renovar el certificado de transporte original durante un breve período que permita transportar la fuente en desuso. Puede requerirse asistencia internacional a fin de determinar y evaluar los parámetros que sean aceptables para permitir el transporte. Cada etapa del transporte de la fuente ha de ser estudiada en función de cada caso.

Este método solía emplearse en el pasado para el transporte de fuentes pequeñas de radiografía industrial, acaso de solo 20 o 30 kg de peso (figura 98). Sin embargo, puede que este método ya no sea aplicable, especialmente tratándose de fuentes de actividad alta. En caso de adoptar este método, es importante asegurarse de que todos los mecanismos de seguridad, por ejemplo, el mecanismo de protección del obturador, funcionen correctamente.



Fig. 98. Para fuentes pequeñas, según el tamaño, la geometría y la actividad de la fuente, debería utilizarse un contenedor especial para transporte.

11.2.1.2. Transporte de la fuente en su portafuente en un bulto de transporte aprobado

Si no es posible o no es práctico retirar una fuente en desuso de su portafuente en el emplazamiento del usuario, puede ser necesario transportarla en un bulto de transporte aprobado con una cavidad de tamaño suficiente

para alojar el portafuente. Esto es factible principalmente para portafuentes pequeños que pesen no más de aproximadamente 500 kg y cuya actividad esté dentro de los límites del Tipo A. Existen varios diseños de bultos del Tipo A que deberían ser adecuados para transportar tales fuentes. En la figura 99 se muestra un ejemplo típico de sobreembalaje de bidón de acero. Los portafuentes pueden ser transportados en un contenedor de esta clase siempre y cuando tengan el blindaje integral adecuado y estén firmemente sujetos en el interior del bulto durante el tránsito.



Fig. 99. Bulto de transporte del Tipo A con gran volumen interior y capacidad de carga (aproximadamente 300 kg).

El transporte de portafuentes que contengan actividades que sobrepasen los valores A_1/A_2 puede requerir bultos de transporte del Tipo B grandes y complejos (figura 100). Tales bultos son bastante caros, y en algunos países que tienen una cantidad relativamente pequeña de fuentes de las categorías 1 y 2 hay sólidas razones para la cooperación internacional. Obviamente, esta opción requeriría algo de debate y consenso para abordar la cuestión del movimiento transfronterizo de material radiactivo.

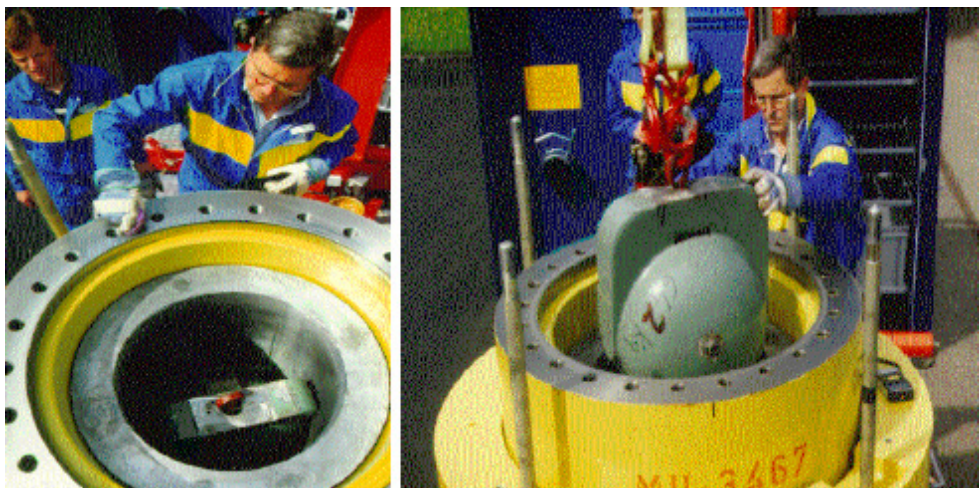


Fig. 100. Bulto de transporte del Tipo B para fuentes de la categoría 1.

En caso de que en un Estado Miembro no se disponga de un bulto de transporte adecuado, quizás sea posible solicitar un arreglo especial a la autoridad competente, la cual podría, por ejemplo, permitir la reutilización del bulto de transporte original. Esta opción podría ser una solución más barata, y las autoridades competentes de los Estados Miembros han de tomarla en debida consideración con miras a facilitar la retirada y el correcto almacenamiento de las fuentes en desuso.

11.2.2. La fuente se retira del portafuente original

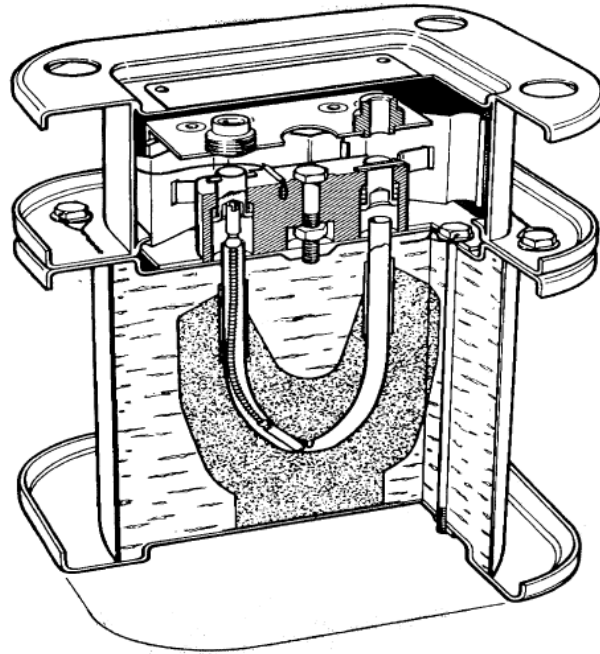
Las fuentes de las categorías 1 y 2 por lo general conllevan la exposición a dosis altas aun cuando el tiempo de exposición sea breve. La retirada de la fuente de su portafuente original solo ha de intentarse cuando sea absolutamente necesario. Por razones de seguridad, se ha de contar con una infraestructura robusta (p. ej., una instalación de celda caliente) y disposiciones técnicas y administrativas (véase la sección 6). Los trabajadores ocupacionalmente expuestos que tengan previsto llevar a cabo dicha operación han de tener amplia experiencia en protección radiológica. La fuente de actividad alta retirada se colocará en un bulto del Tipo B. En la figura 101 se muestra un ejemplo de bulto del Tipo B adecuado.



Fig. 101. Ejemplo de bulto de transporte del Tipo B.

11.2.2.1. Transferencia de la fuente desde el dispositivo hasta un contenedor de transporte específico

Muchos tipos de portafuentes están diseñados para permitir el cambio de fuentes sobre el terreno. Entre ellos figuran las unidades más modernas de ^{60}Co utilizadas en radiografía industrial y en teleterapia. En lo que atañe a las unidades de radiografía industrial, retirar la fuente del portafuente y colocarla en un contenedor blindado pequeño es un proceso sencillo. En la figura 102 se muestra un ejemplo de bulto de transporte diseñado para su uso específico con una fuente de radiografía industrial.



Cambiador de fuentes TN 650, COC 0148

Fig. 102. Bulto de transporte de una fuente de radiografía industrial (Tipo B; 8,8 TBq de ^{192}Ir).

En el caso de las unidades de teleterapia, se conecta al cabezal de teleterapia un cofre de transporte grande específico y se empuja o arrastra la fuente desde el cabezal hacia el cofre de transporte. El apretado encaje del cabezal de teleterapia y los bultos de transporte asegura que la dosis de radiación a la que se expongan los trabajadores sea mínima. El propietario de este tipo de bulto de transferencia y transporte generalmente es el fabricante o el suministrador. En la figura 103 se ilustra la operación de intercambio de fuentes en una unidad de teleterapia.

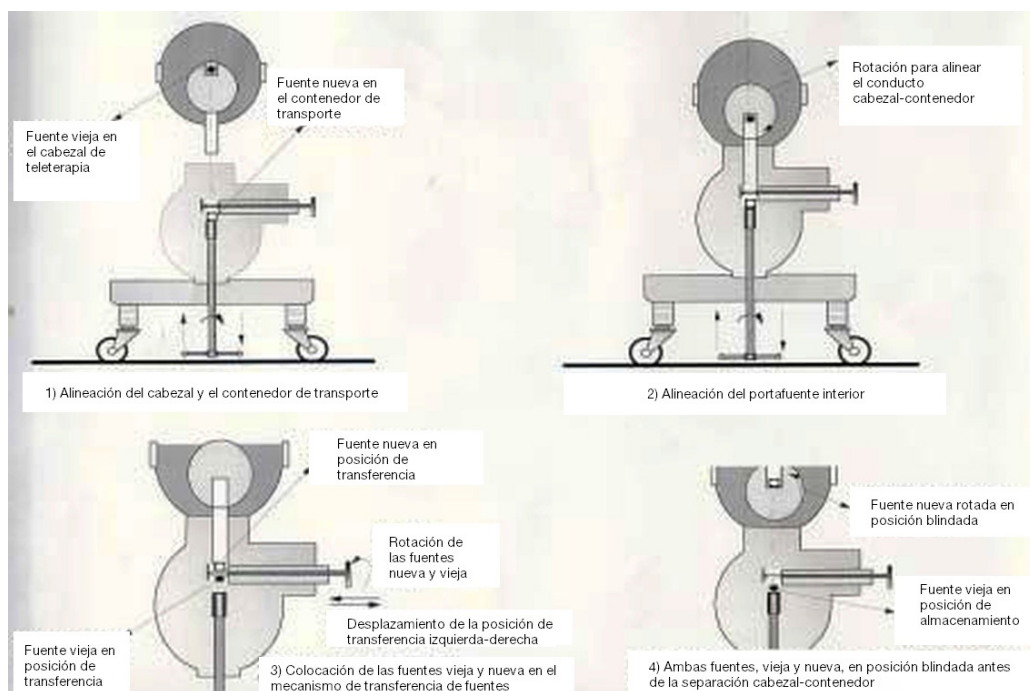


Fig. 103. Diagrama esquemático que ilustra el intercambio de fuentes en una unidad de teleterapia.

11.2.2.2. Transferencia de la fuente desde el dispositivo hasta un contenedor de transporte genérico

Para muchas de las unidades de teleterapia más antiguas y muchas de las unidades de radiografía industrial de actividad alta más antiguas no hay disponibles bultos de transporte de fuentes específicos, o bien la transferencia sobre el terreno no es apropiada por razones de diseño. Aun cuando no haya disponible un bulto específico de transporte de fuentes, quizás sea posible transferir la fuente a un bulto de transporte alternativo adecuado. De hecho, esto puede ser indispensable si la instalación receptora no está en condiciones de manipular la fuente en el interior del portafuente (p. ej., debido a su tamaño) o si no existe ningún bulto de transporte con que transportar la unidad completa (la fuente dentro del portafuente; véase más adelante).

Si es conveniente transferir la fuente extrayéndola del portafuente y colocándola en un bulto de transporte blindado, hay disponibles varios bultos de transporte muy versátiles. La transferencia de la fuente requiere una instalación apropiada y personal bien capacitado. En la figura 104 se muestran diversos contenedores con blindaje de distinto espesor. Pueden anidarse uno dentro de otro para obtener formatos del Tipo A o del Tipo B con un espesor total de blindaje de hasta 150 mm. Un bulto de este diseño ofrece una gran cavidad interna y considerable flexibilidad.



Fig. 104. Carga de un contenedor interior blindado de ^{137}Cs en un bulto del Tipo B después de haber retirado las fuentes de ^{137}Cs de un irradiador de investigación.

Los bultos de transporte genéricos, como el descrito anteriormente, no están diseñados con la finalidad específica de transferir una fuente que esté en un portafuente de un diseño concreto. Por consiguiente, será necesario desarrollar una solución técnica a la medida que permita transferir la fuente al bulto exponiendo a los operadores a una mínima dosis de radiación. Se podría, por ejemplo, conectar el bulto directamente al portafuente o, en su defecto, hacer una transferencia en dos etapas empleando un cofre de transferencia hecho a la medida. La transferencia de fuentes sin blindaje ha de evitarse en todos los casos si se trata de fuentes de las categorías 1 y 2. El uso de este método requiere la elaboración, ensayo y ejecución de procedimientos técnicos por personal muy cualificado.

En la instalación de almacenamiento receptora también se necesitará una solución para retirar la fuente del bulto de transporte. A menudo esto se hace dentro de una celda caliente.

En caso de que no se disponga localmente de conocimientos especializados suficientes para llevar a cabo la retirada de la fuente o que se carezca del equipo o los instrumentos, será preciso establecer contacto con un suministrador, fabricante o propietario de bultos o fuentes similares, o bien con una organización de gestión de desechos extranjera o una organización internacional (p. ej., el OIEA), con el objeto de solicitar asistencia.

11.3. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS

En muchos casos, las fuentes permanecen en los locales del usuario debido a problemas para determinar un método adecuado y económico para transportarlas al suministrador o al fabricante, a otro usuario, a una instalación de acondicionamiento, a una instalación de almacenamiento ubicada en una organización central de gestión de desechos radiactivos o a una instalación de disposición final, de conformidad con las normas internacionales de transporte pertinentes [48]. Algunas de las razones principales de la demora en el transporte de una fuente en desuso desde el emplazamiento del usuario son las siguientes:

- financiación insuficiente;
- dificultades para la concesión de licencias;
- inexistencia del certificado de la fuente o de información sobre ella;
- inexistencia de un certificado de material radiactivo en forma especial; e
- inexistencia de un contenedor de transporte certificado adecuado.

Es importante que las autoridades competentes y el licenciario colaboren para buscar soluciones a esos problemas a fin de poder transportar las fuentes en desuso de manera segura.

11.3.1. Financiación insuficiente

En la actualidad, el transporte internacional de las fuentes en desuso suele ser caro porque no se dispone del bulto de transporte original o porque su certificado está vencido. Puede que, una vez adquirido y entregado el equipo, una instalación no prevea el costo de la transferencia de propiedad de la fuente cuando algún día el equipo sea retirado. La razón podría ser que los propietarios de la instalación no tengan un mecanismo presupuestario para devengar un costo cuya realización dista mucho en el futuro (varios decenios, tal vez) y cuyo valor solo puede ser estimado. Otra razón podría ser que la instalación suponga que puede cubrir el costo de la transferencia de la propiedad con cargo a su presupuesto operativo o como una condición de compra de equipo nuevo. Esto puede ocasionar presión financiera cuando llega el momento de transferir la propiedad, con la correspondiente tentación de recurrir a opciones menos caras. Tales alternativas pueden dar lugar a una mayor probabilidad de pérdida de control de la fuente gastada o en desuso.

11.3.2. Dificultades para la concesión de licencias

En algunos países es necesario obtener una licencia para el transporte de material radiactivo. A consecuencia de ello, cuando las fuentes se transportan a través de varias fronteras es preciso emplear una empresa local o un conductor autóctono del país en el que rija esa norma. Ello comporta esfuerzos y gastos administrativos adicionales importantes.

11.3.3. Inexistencia del certificado de la fuente o de información sobre ella

Para decidir si una fuente puede ser transportada en un bulto disponible es necesario tener el certificado de la fuente o información sobre ella. El certificado de la fuente o la información sobre la fuente pueden usarse para determinar si la actividad y las dimensiones físicas de la fuente son aptas para el bulto de transporte disponible. En caso de que no se disponga del certificado de la fuente o de información sobre ella, pueden considerarse las siguientes opciones:

- se puede obtener un nuevo certificado o información sobre la fuente a través del fabricante o el suministrador;
- se tiene que hacer una caracterización de la fuente para determinar su actividad, el isótopo y la integridad de la contención.

11.3.4. Inexistencia de un certificado de material radiactivo en forma especial

En muchos casos, el certificado de material radiactivo en forma especial puede no ser válido ya para la fuente en desuso. Esto sucede, por lo general, cuando el diseño de la cápsula es obsoleto o el fabricante de la fuente ha cesado en su actividad comercial y, por lo tanto, ya no está en condiciones de prolongar la validez del certificado. Que el certificado de material radiactivo en forma especial esté vencido no implica que la fuente radiactiva haya dejado de cumplir los requisitos técnicos del “material radiactivo en forma especial”. Puede ser que la fuente aún cumpla los requisitos de contención para bultos del Tipo B y, por consiguiente, pueda transportarse de manera segura. Es importante que la autoridad competente y el licenciataria trabajen juntos en la búsqueda de una solución factible para facilitar el transporte de la fuente radiactiva sellada. Esta podría consistir en la renovación del certificado especial durante un breve período, la modificación del certificado de transporte de manera que la fuente radiactiva se incluya como forma no especial o la concesión de una licencia en virtud de un arreglo especial.

11.3.5. Falta de adecuación de un bulto de transporte original

Aun cuando se disponga del certificado de la fuente y el certificado especial, puede que el bulto de transporte en que originalmente se entregó la fuente o el dispositivo ya no cumpla la reglamentación vigente en materia de transporte. En la mayor parte de los casos, el bulto de transporte sigue estando en buenas condiciones, pero el certificado de aprobación por la autoridad competente ya no es válido. Un ejemplo de este problema son los cabezales de teleterapia antiguos, que se entregaban completos con sus fuentes en sobreembalajes simples (figura 105).

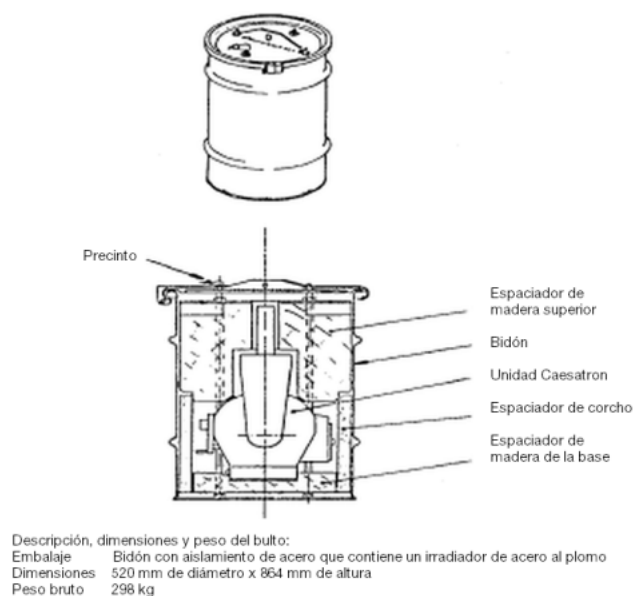


Fig. 105. Bulto de transporte para una unidad de teleterapia de ^{137}Cs antigua que no cumple las normas actuales.

Algunas veces no hay disponible un contenedor de transporte apropiado o se desconoce (se ha perdido) el diseño del portafuente y el diagrama con la descripción del orden de retirada de la fuente. En esos casos es imposible recargar la DSRS y el transporte solo puede llevarse a cabo en virtud de un arreglo especial. Por ejemplo, se puede utilizar el cuerpo de un irradiador (con algunas mejoras de seguridad) para el transporte y almacenamiento provisional de fuentes DSRS (véase la figura 106). Este transporte requiere la aprobación y el control de la autoridad reguladora nacional.



Fig. 106. Irradiador cargado con fuentes DSRS de ^{137}Cs listo para su transporte a la instalación de disposición final.

12. DISPOSICIÓN FINAL

Las fuentes radiactivas selladas en desuso (DSRS) para las que no existan opciones de reciclado o repatriación deberían declararse desechos y someterse a disposición final en una instalación apta de conformidad con los instrumentos jurídicos, las normas de seguridad y las buenas prácticas internacionales pertinentes con fines de gestión segura a largo plazo. La preparación de una instalación de disposición final exige infraestructura pertinente, en particular una política nacional de gestión de desechos y la correspondiente estrategia de aplicación [50], un marco regulador y los recursos financieros, humanos y técnicos necesarios. En caso de que no pueda procederse fácilmente a la disposición final de las DSRS en instalaciones ya existentes o previstas, debe elaborarse una solución específica de disposición final y aportarse la infraestructura correspondiente. En ese contexto, la aplicación de una vía adecuada de disposición final para las DSRS sigue siendo motivo de preocupación a escala internacional, especialmente en los Estados Miembros que disponen de recursos limitados [68-71].

En la sección 2.1 se exponen algunos factores importantes que deben tenerse en cuenta al decidir la opción de disposición final más adecuada. Debería evaluarse el inventario de fuentes, así como las correspondientes características de los radionucleidos cuya disposición final se pretende. La disposición final debería evaluarse de conformidad con los requisitos de seguridad relativos a la disposición final de desechos radiactivos [72]. A este respecto, se presta especial atención a la concentración de la actividad típica en muchas DSRS, así como a otras consideraciones como la actividad general y los períodos de semidesintegración. Las opciones de disposición final deberían estudiarse en el contexto de los planes nacionales actuales y futuros más amplios relacionados con la utilización de la tecnología nuclear, la investigación o la generación de energía nucleoelectrónica. Las DSRS que se declaran como desechos se acondicionan normalmente en bultos de desechos cuyas propiedades y características, que pueden ejercer influencia, deben diseñarse para garantizar la aceptabilidad de la disposición final en una instalación determinada. Por último, los requisitos de aceptación de desechos sirven de instrumento de gestión para verificar si un determinado inventario de fuentes DSRS acondicionadas en bultos puede aceptarse con fines de disposición final en una instalación determinada, si debe efectuarse una evaluación adicional de la seguridad específica o si debe prepararse una vía alternativa de disposición final.

En principio, puede aportarse una solución adecuada de disposición final para todas las DSRS declaradas desechos. Las opciones disponibles consisten en instalaciones para la disposición final cerca de la superficie, instalaciones para la disposición final geológica e instalaciones especiales para la disposición final en pozos barrenados. En la sección 2.2 se presenta un breve resumen de estas opciones. Efectivamente, se ha avanzado de manera notable en la disposición final de desechos de actividad baja e intermedia, y hace ya varios decenios que están en funcionamiento instalaciones que aceptan estos tipos de desechos. Además, varios países han presentado o presentarán próximamente una solicitud de licencia para la construcción de una instalación de disposición final geológica destinada a recibir desechos de actividad intermedia, desechos de actividad alta o combustible gastado declarado desecho. Por último, el concepto de disposición final en pozos barrenados, que ha sido objeto de debida atención, se propone en calidad de instalación de disposición final para acoger fuentes DSRS declaradas desechos. La experiencia adquirida y las enseñanzas extraídas en relación con estos tipos de instalación de disposición final se repasan sucintamente en la sección 2.3.

12.1. FACTORES QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN DE LAS OPCIONES DE DISPOSICIÓN FINAL

La disposición final del inventario de fuentes DSRS declaradas desechos podría efectuarse junto con la de otros desechos radiactivos en instalaciones de disposición final ya existentes o previstas o en una instalación de disposición final diseñada específicamente y reservada para la disposición final de ese inventario. Además, una solución específica de disposición final puede, en determinadas condiciones, compartir emplazamiento con una instalación ya existente, o pueden adaptarse partes del diseño de una instalación existente como requisito previo para aceptar en ella fuentes DSRS declaradas desechos.

La solución que resulte más apropiada a un Estado Miembro dependerá de varios factores, en particular del inventario de fuentes DSRS y de las necesidades de disposición final conexas, así como del inventario de desechos

radiactivos que cabe esperar de otras actividades en relación con los cuales puede que ya existan o estén previstas instalaciones de disposición final.

Independientemente del contexto, la disposición final debería evaluarse de conformidad con los requisitos de seguridad relativos a la disposición final de desechos radiactivos. En una primera fase de análisis, las DSRS deben vincularse con una clase de desecho para comprender las correspondientes necesidades de disposición final. Sin embargo, las fuentes radiactivas selladas se clasifican en función del riesgo que plantea la fuente cuando no está sujeta a control. Ello se diferencia de las clases de desechos elaboradas para orientar las decisiones estratégicas de desarrollo de la disposición final, y las propiedades radiológicas de las fuentes deben evaluarse para decidir una opción adecuada de disposición final. En consecuencia, para adoptar decisiones fundamentadas deberían comprenderse el sistema de clasificación de desechos del OIEA, las propiedades radiológicas de las DSRS evaluadas y cotejadas con este sistema y las opciones adecuadas de disposición final seleccionadas para que esta resulte segura y eficiente.

12.1.1. Sistema de clasificación de desechos del OIEA

Para comprender qué opción de disposición final puede ser adecuada, hay que tener en cuenta, en primer lugar, las clases de desechos a las que deben asignarse las DSRS declaradas desechos. Si una fuente radiactiva sellada en desuso se declara desecho radiactivo, le son aplicables todos los principios de seguridad correspondientes a los desechos [28]. El OIEA ha elaborado un sistema de clasificación de desechos aceptado internacionalmente que permite agrupar los desechos radiactivos, incluidas las DSRS, en las seis clases siguientes en función de la actividad y los períodos de semidesintegración de los radionucleidos [66]:

- 1) Desechos exentos (EW): desechos que cumplen los criterios necesarios para la dispensa, exención o exclusión del control reglamentario con fines de protección radiológica según se describe en la referencia [59].
- 2) Desechos de período muy corto (VSLW): desechos que pueden ser almacenados para su desintegración durante un corto lapso (de unos años como máximo) y posteriormente, conforme a disposiciones aprobadas por el órgano regulador, dispensados de control reglamentario para su disposición final no controlada, utilización o descarga. Esta clase corresponde a desechos que contienen principalmente radionucleidos con un período de semidesintegración muy corto, utilizados frecuentemente con fines de investigación y médicos.
- 3) Desechos de actividad muy baja (VLLW): desechos que no cumplen necesariamente los criterios que rigen para los EW, pero no precisan un alto grado de contención y aislamiento y, por consiguiente, se prestan a la disposición final en instalaciones de tipo vertedero cerca de la superficie con limitado control reglamentario. Estas instalaciones de tipo vertedero también pueden contener otros desechos peligrosos. La concentración de radionucleidos de período más largo en los VLLW es, por lo general, muy baja.
- 4) Desechos de actividad baja (LLW): desechos que se encuentran por encima de los niveles de dispensa, pero contienen cantidades limitadas de radionucleidos de período largo. Esos desechos requieren aislamiento y contención sólidos por períodos de hasta varios cientos de años y se pueden someter a disposición final en instalaciones de almacenamiento en estructuras artificiales cerca de la superficie. Esta clase abarca un espectro muy amplio de desechos. Los LLW pueden incluir radionucleidos de período corto con un nivel más elevado de concentración de la actividad, así como radionucleidos de período largo, pero solo con niveles relativamente bajos de concentración de la actividad.
- 5) Desechos de actividad intermedia (ILW): desechos que, en razón de su contenido, en particular de radionucleidos de período largo, precisan un grado mayor de contención y aislamiento que el que ofrece la disposición final cerca de la superficie. No obstante, durante el almacenamiento y la disposición final de los ILW no hace falta adoptar disposiciones para la disipación del calor, o basta con hacerlo de forma limitada. Los ILW pueden contener radionucleidos de período largo, en particular radionucleidos emisores de radiación alfa, que no se desintegrarán hasta un nivel de concentración de la actividad que resulte aceptable para proceder a la disposición final cerca de la superficie durante el tiempo en que se puede depender de los controles institucionales. Por lo tanto, los desechos de esta clase requieren una disposición final a mayor profundidad, del orden de decenas de metros hasta varios cientos de metros.
- 6) Desechos de actividad alta (HLW): desechos cuyos niveles de concentración de la actividad son lo suficientemente elevados como para que el proceso de desintegración radiactiva genere cantidades importantes de calor; o desechos con grandes cantidades de radionucleidos de período largo que es preciso tener en cuenta

en el diseño de una instalación de disposición final destinada a este tipo de desechos. La opción en general aceptada para la disposición final de HLW es la disposición final en formaciones geológicas profundas y estables, normalmente a varios cientos de metros, o más, bajo la superficie.

Estas clases de desechos ofrecen orientación general en cuanto a la duración y la solidez de la contención y el aislamiento, así como otras consideraciones, como las relativas a la disipación del calor, que son necesarias para la disposición final segura de los desechos. Cabe deducir de ellas orientación general sobre las opciones adecuadas para la correspondiente instalación de disposición final.

12.1.2. Inventario de fuentes DSRS, correspondientes características de los radionucleidos y clases de desechos

Si el inventario de fuentes DSRS consta de varias clases de desechos, deben estudiarse al respecto distintas opciones de disposición final que van de la disposición final cerca de la superficie a la disposición final geológica, incluidas instalaciones de disposición final en pozos barrenados a profundidades diversas. Las consideraciones en materia de seguridad permiten reagrupar el inventario en la opción de disposición final adecuada para la clase de desechos de nivel más alto. Sin embargo, en función de consideraciones relativas a los costos, al volumen general del inventario de fuentes DSRS y a la posible opción de utilizar las instalaciones existentes para las clases de desechos de nivel más bajo, puede plantearse la disposición final del inventario de fuentes DSRS en varias instalaciones adecuadas de disposición final.

El análisis de las necesidades de disposición final solo puede llevarse a cabo si se conoce el inventario de fuentes DSRS declaradas desechos. Las DSRS presentan un alto grado de variabilidad en sus características físicas y radiológicas, como por ejemplo el contenido de radionucleidos, los períodos de semidesintegración, las actividades totales y la concentración de la actividad. Estas características determinan la clase de desechos a la que deberían asignarse las DSRS de conformidad con la clasificación presentada en la sección anterior y, por ende, la duración y la solidez de la contención y el aislamiento previstas conforme a la opción de disposición final seleccionada. No existe correspondencia exacta entre las categorías de fuentes 1 a 5 y la clase de desechos a la que terminarán asignadas. Evidentemente, las fuentes que contienen radionucleidos con niveles de actividad más altos y períodos de semidesintegración más largos necesitan un grado más alto de contención y aislamiento, y puede que deban considerarse ILW. Otras podrán tener consideración de VLLW.

Puede ofrecerse cierta orientación preliminar sobre la base del análisis de las DSRS comunes y las propiedades de los radionucleidos conexos. En la referencia [23] aparecen resumidos datos sobre los radionucleidos utilizados en las fuentes radiactivas selladas para diversas aplicaciones. El cuadro 8 se basa en los datos presentados en la referencia [23] y, a título de ejemplo, presenta los períodos de semidesintegración y la serie de actividades de algunos radionucleidos utilizados en las fuentes radiactivas selladas.

CUADRO 8. PERÍODOS DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y SERIE DE ACTIVIDADES DE DETERMINADOS RADIONUCLEIDOS UTILIZADOS EN FUENTES RADIATIVAS SELLADAS PARA DISTINTAS APLICACIONES

Radionucleido principal	Período de semidesintegración	Actividad mínima para el nucleido (Bq)	Actividad máxima para el nucleido (Bq)	Aplicación
³ H	12,3 a	1,9E + 09	1,1E + 10	Aplicaciones militares, aplicaciones industriales, dispositivos gaseosos emisores de luz, blancos para tubos de neutrones
⁶⁰ Co	5,3 a	9,3E + 09	5,6E + 17	Irradiadores, teleterapia, radiografía industrial, braquiterapia, calibradores industriales
⁷⁵ Se	120 d	3,0E + 12	3,0E + 12	Radiografía industrial
⁸⁵ Kr	10,7 a	1,9E + 09	3,7E + 10	Calibradores industriales, pararrayos
⁹⁰ Sr	28,6 a	3,7E + 08	2,5E + 16	Generadores termoeléctricos de radioisótopos, mediciones del espesor, aplicadores para ojos
¹²⁵ I	60 d	1,5E + 09	3,0E + 10	Braquiterapia
¹³⁷ Cs	30,1 a	3,0E + 08	1,9E + 17	Irradiadores, braquiterapia, calibradores industriales, perfilaje de pozos/calibradores de humedad
¹⁶⁹ Yb	32 d	9,3E + 10	3,7E + 11	Radiografía industrial
¹⁷⁰ Tm	129 d	7,4E + 11	7,4E + 12	Radiografía industrial
¹⁹² Ir	74 d	7,4E + 08	7,4E + 12	Radiografía industrial, braquiterapia
²²⁶ Ra	1600 a	2,6E + 05	1,9E + 09	Braquiterapia, pararrayos, detectores de humo
²³⁸ Pu	87,8 a	1,1E + 11	1,0E + 13	Generadores termoeléctricos de radioisótopos, marcapasos
²³⁹ Pu-Be	24 100 a	7,4E + 10	3,7E + 11	Investigación
²⁴¹ Am	432 a	4,8E + 07	8,5E + 11	Calibradores industriales, detectores de humo, pararrayos, densitometría ósea
²⁴¹ Am-Be	432 a	1,9E + 10	8,5E + 11	Investigación
²⁴⁴ Cm	18,1 a	7,4E + 09	3,7E + 10	Calibradores industriales
²⁵² Cf	2,6 a	1,1E + 06	4,1E + 09	Calibradores industriales, perfilaje de pozos de petróleo, activación neutrónica, aplicación médica

Cabe señalar que las gamas de actividad presentadas en el cuadro 8 se refieren a las fuentes en uso. Cuando la fuente cae en desuso, sus actividades se sitúan en el nivel mínimo indicado o por debajo de este, y siguen disminuyendo en función de su período de semidesintegración. A título de ejemplo, un inventario de fuentes DSRS provisto de propiedades específicas para las fuentes puede ser consonante con las siguientes opciones de disposición final:

- Las fuentes radiactivas que contengan niveles de actividad por debajo de los niveles de dispensa, por ejemplo, en el caso de los detectores de humo, siempre que esta opción esté prevista en la reglamentación nacional,

podrán ser objeto de disposición final en vertederos de conformidad con la opción de gestión de desechos exentos.

- Las fuentes radiactivas de actividad baja a media con períodos de semidesintegración muy cortos (normalmente, inferiores a unos 100 días) tardarán unos pocos años en desintegrarse hasta alcanzar el nivel de dispensa. Desde el punto de vista de la gestión de los desechos, puede permitirse la desintegración segura de esas fuentes en una instalación de almacenamiento de conformidad con la opción de gestión de VSLW.
- Las fuentes radiactivas que contengan niveles de actividad muy bajos, aunque contengan radionucleidos de período muy largo, como ^{14}C (período de semidesintegración = 5700 a), ^{36}Cl (período de semidesintegración = 300 000 a) y ^{129}I (período de semidesintegración = 17 millones de a), como las que pueden utilizarse, por ejemplo en la calibración de instrumentos, pueden ser aceptables en instalaciones de disposición final de tipo vertedero cerca de la superficie de conformidad con la gestión de VLLW.
- Las fuentes radiactivas con períodos de semidesintegración breves (de hasta 30 años, como ^{60}Co , ^{90}Sr y ^{137}Cs) pueden someterse a disposición final, en general, en instalaciones cerca de la superficie, siempre que su actividad disminuya hasta límites establecidos en el análisis de seguridad correspondientes a la duración prevista del control institucional y siempre que se respeten todos los criterios en materia de densidad de la actividad, de conformidad con la opción de gestión de LLW. Esta estimación aproximada es aplicable a las fuentes cuya actividad disminuye a niveles de dispensa en un plazo de 300 años sin superar las actividades específicas definidas en la justificación de la seguridad.
- Puede que las fuentes de actividad alta cuyo período de semidesintegración es corto, al igual que las fuentes que contienen radionucleidos de período largo, como ^{238}Pu y ^{226}Ra , deban someterse a una disposición final geológica que ofrezca seguridad a largo plazo, de conformidad con la opción de gestión de los ILW.

Los ejemplos enumerados se refieren a instalaciones de disposición final elaboradas con fines de gestión de desechos radiactivos en general. Si se va a elaborar una instalación de disposición final específica destinada a fuentes DSRS, puede que la disposición final en pozos barrenados sea la opción más eficiente a efectos de ofrecer un grado de protección adecuado [73]. Dependiendo de su emplazamiento y de la profundidad de su colocación, en principio podría aportar un nivel de aislamiento y contención consonante con los LLW, así como con los ILW. Un pozo barrenado de ese tipo podría emplazarse como instalación independiente o emplazarse conjuntamente con otra instalación de disposición final.

Se especificarán aspectos cuantitativos, como los valores del contenido de actividad permisible para cada radionucleido importante, así como los valores de la concentración local de las actividades y la salida de energía térmica, sobre la base de evaluaciones de la seguridad de la instalación de disposición final en particular. A su vez, estos aspectos se refieren a los escenarios de seguridad utilizados en las evaluaciones, incluidas consideraciones relativas a la emisión y transferencia de radionucleidos al entorno accesible y las probabilidades de intromisión involuntaria. A continuación, estos valores pueden especificarse como parte de los requisitos de aceptación de desechos en calidad de instrumento de gestión para ayudar a decidir si unos determinados desechos radiactivos pueden ser objeto de disposición final segura en esta instalación.

12.1.3. Opciones de disposición final de fuentes DSRS en el contexto del inventario nacional de desechos radiactivos

Cuando se selecciona una opción adecuada de disposición final en relación con el inventario de fuentes DSRS declaradas desechos, debería procederse en consonancia con la óptica más amplia del contexto sociopolítico y reglamentario nacional teniendo en cuenta: i) el inventario de desechos radiactivos; ii) las características del emplazamiento, y iii) el diseño de la instalación de disposición final. Este contexto nacional aparece ilustrado en la figura 107.

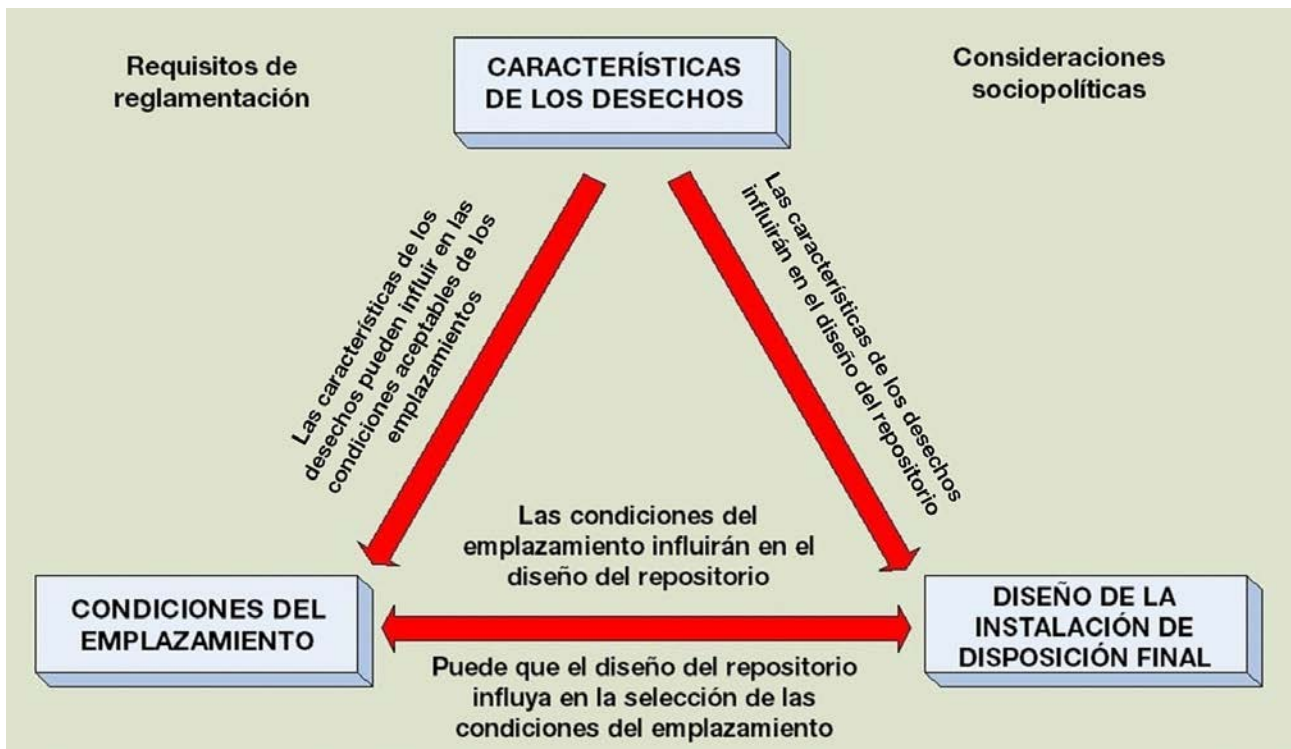


Fig. 107. Características del inventario de desechos en su totalidad como influencia en el diseño del repositorio.

En el caso de los programas pequeños de gestión de desechos radiactivos, que constan, en lo fundamental o en exclusiva, de fuentes DSRS declaradas desechos, lo más acertado es preparar una o varias instalaciones de disposición final específicas. Una solución debidamente estudiada con capacidad de garantizar una disposición final eficiente y segura de volúmenes pequeños de desechos radiactivos es el concepto de disposición final en pozos barrenados [73]. Si fuera necesario adquirir experiencia inicial en la aplicación de este concepto, sería adecuada la opción de proceder en primer lugar a la disposición final de las DSRS calificadas de LLW en una instalación específica de disposición final en un pozo barrenado y, en una segunda fase posterior, proceder a la disposición final de las DSRS calificadas de ILW en una instalación aparte de disposición final en un pozo barrenado que ofrezca un aislamiento y una contención más sólidos. Si, por otro lado, ya se ha podido adquirir experiencia en el marco de una aplicación previa del concepto de disposición final en pozos barrenados que haya demostrado efectivamente su solidez, puede que sea preferible seleccionar la opción de disposición final adecuada para los ILW y someter las DSRS calificadas de LLW a disposición final conjunta en ese mismo pozo barrenado.

También debe plantearse la manera de adaptar la disposición final de fuentes DSRS declaradas desecho a la infraestructura más amplia de gestión de los desechos radiactivos, por ejemplo a las instalaciones de disposición final ya existentes o previstas destinadas a recibir VLLW o LLW.

En el caso de los programas de gestión de desechos radiactivos que tienen que ocuparse de un inventario más extenso, por ejemplo de LLW y fuentes DSRS, puede elegirse entre varias opciones. El inventario de fuentes DSRS declaradas desechos cuya disposición final en una instalación de disposición final cerca de la superficie para LLW es aceptable puede acondicionarse en un bulto de desechos adecuado y someterse a disposición final al igual que otros LLW. Puede que deba prestarse especial atención a la combinación de la concentración de la actividad y el período de semidesintegración, que en las DSRS puede ser superior a la de otros LLW. Ello podrá coincidir, o no, con los requisitos de aceptación de desechos para las instalaciones de disposición final de tipo vertedero o cerca de la superficie. Si no coincide, cabe plantearse la opción de almacenar parte del inventario de fuentes DSRS hasta que la desintegración natural reduzca la concentración de la actividad a un nivel consonante con los requisitos. Si la opción resultante no es razonable en el sentido de que la disposición final segura exige un nivel más alto de contención y aislamiento del garantizado por la disposición final cerca de la superficie, puede que una opción disponible y eficiente consista en proceder a la disposición final en un pozo barrenado a una profundidad apropiada y con barreras artificiales adecuadas. A continuación, podrá optarse por el emplazamiento

conjunto con la instalación existente de disposición final cerca de la superficie, en función de las propiedades del emplazamiento y de otras consideraciones.

Si, además de explotar una instalación de disposición final cerca de la superficie, el programa de gestión de desechos radiactivos debe elaborar soluciones para la disposición final de ILW o HLW, las DSRS cuya disposición final en la instalación existente sea inaceptable podrían permanecer en almacenamiento a largo plazo hasta la entrada en funcionamiento de un repositorio geológico.

12.1.4. Acondicionamiento de fuentes DSRS con fines de disposición final: bulto de desechos

Un dispositivo radiactivo contiene uno o más radionucleidos de radiactividad y forma química conocidas que están sellados en una cápsula especial que ofrece contención primaria. En la mayoría de los casos, las fuentes radiactivas deberán acondicionarse en mayor medida y colocarse en bultos antes de su disposición final para contribuir a la solidez de su contención a largo plazo (véase la sección 10) y adaptar el bulto de desechos a la instalación de disposición final. Un bulto de fuentes radiactivas con fines de disposición final puede contener más de un tipo de fuente, así como capas de contención adicionales y cualquier material en calidad de matriz añadido para mejorar su comportamiento general en cuanto a la seguridad. Ello aporta efectivamente una barrera artificial con fines de aislamiento y contención, por lo que su diseño debería ser consonante con la opción de disposición final seleccionada y adecuado para ella.

Los requisitos del diseño de un bulto de disposición final se examinan en detalle en la referencia [48]. El bulto puede diseñarse para que contribuya a la contención de las fuentes radiactivas previniendo o limitando la emisión de radionucleidos a la geosfera. Pueden aplicarse dos enfoques para garantizar la longevidad de la contención: uso de materiales resistentes a la corrosión o de un contenedor con paredes gruesas cuya corrosión lleve un tiempo suficientemente extenso. En ambos casos, cumplen un papel importante los materiales seleccionados para el bulto, así como los efectos del entorno físico y geoquímico de la zona de disposición final. Normalmente, la capa externa del bulto puede estar hecha de metal, hormigón o materiales compuestos. La matriz (relleno) en la que se inmovilizan las fuentes radiactivas también puede tener un efecto apreciable en las propiedades del bulto e influir decisivamente en el comportamiento que se le exige.

Dentro del bulto de la fuente radiactiva pueden tener lugar procesos químicos, microbiológicos o radiolíticos que desprendan gas, calor o corrosión en función del radionucleido, su actividad y las características de los materiales del bulto. Los posibles problemas en materia de generación de gases deberían abordarse en una fase inicial del desarrollo de un concepto de disposición final y del diseño de las unidades de disposición final [74-77].

La actividad máxima aceptable en un bulto se determinará a partir de evaluaciones de la seguridad operacional y posterior al cierre. En algunos casos, puede que el uso de un bulto reduzca los niveles de radiación externa en suficiente medida para hacer posible la manipulación y el transporte. Sin embargo, el blindaje no se plantea después de haber sometido el bulto a disposición final, y puede que sean aplicables consideraciones especiales en materia de almacenamiento y transporte si el bulto de disposición final no ofrece un blindaje adecuado.

Si la disposición final va a tener lugar en unidades de dimensiones limitantes, como pozos barrenados, las dimensiones exteriores del correspondiente bulto deberían adaptarse a ellas. Otros requisitos técnicos, por ejemplo, en materia de manipulación, podrán limitar aún más el diseño del bulto.

Las consideraciones relativas a la reagrupación y colocación de fuentes DSRS en un bulto de desechos, al igual que el diseño del correspondiente bulto, deberían plantearse en consonancia con la opción de disposición final seleccionada para el inventario de fuentes DSRS. En particular, la concentración de la actividad en un determinado bulto de desechos puede ser un criterio para determinar si se acepta su disposición final en una instalación cerca de la superficie. En un sentido más amplio, el diseño de los bultos de desechos y su contenido de desechos se refieren a los requisitos de aceptación de desechos de la instalación de disposición final y, por ende, a los escenarios de seguridad determinados al solicitar y recibir una licencia para depositar desechos en esa instalación.

12.1.5. Requisitos de aceptación de desechos con fines de disposición final

Durante la explotación de una instalación de disposición final de desechos radiactivos, la aceptación con fines de disposición final de un determinado inventario de fuentes DSRS acondicionado en bultos de desechos se decide comparando las propiedades de los desechos y los bultos de desechos con los requisitos de aceptación de desechos. Los requisitos de aceptación de desechos son un instrumento de gestión que permite verificar si la disposición

final de que se trate cumple las evaluaciones de seguridad y las necesidades administrativas y operacionales de la instalación en cuestión [74, 75]. En la práctica, los requisitos de aceptación de fuentes DSRS, al igual que los aplicables a otros tipos de desechos radiactivos, deben definirse de modo que los resultados de las evaluaciones de la seguridad operacional y posterior al cierre se correspondan con los requisitos de seguridad aplicables (por ejemplo, limitaciones o metas en cuanto a las dosis o los riesgos). Aunque en principio pueden definirse requisitos de aceptación de desechos genéricos antes del emplazamiento y el diseño de una determinada instalación y de la realización de la correspondiente evaluación de la seguridad, en cuyo caso estos requisitos genéricos se convertirían en requisitos para el diseño de esa instalación, los requisitos efectivos de aceptación de desechos solo pueden establecerse sobre la base de una evaluación completa de la seguridad y deben recibir el visto bueno de la autoridad nacional en materia de seguridad. Obsérvese que, además de los requisitos de aceptación de desechos definidos en relación con los resultados de las evaluaciones de la seguridad, los requisitos adicionales de ese tipo se refieren a criterios técnicos definidos en relación con el diseño de la instalación, como las dimensiones y los límites de peso del bulto, o con criterios administrativos, por ejemplo, con fines de garantizar la identificación y el seguimiento de los desechos.

Si está prevista la disposición final en un repositorio cerca de la superficie, un factor que reviste especial importancia es la duración prevista de los controles institucionales, que contribuyen a la determinación del contenido y la concentración aceptables de radionucleidos de período más largo en el inventario destinado a la disposición final. Otra consideración importante es la concentración de la actividad de las DSRS declaradas desechos, así como los escenarios empleados para determinar la seguridad a largo plazo de su disposición final en una instalación cerca de la superficie.

Las DSRS serán objeto de disposición final en instalaciones existentes o en otras desarrolladas recientemente. En el primer caso, se determinará, en función de requisitos de aceptación de desechos aprobados por un órgano regulador de la instalación existente, qué fuentes DSRS pueden aceptarse fácilmente con fines de disposición final. En caso de que las DSRS declaradas desechos constituyan un flujo de desechos que no estaba previsto originalmente en esa instalación y de que sus características no sean compatibles con los requisitos de aceptación de desechos, su aceptabilidad a efectos de disposición final debe estar justificada por una evaluación específica de la seguridad y aprobada por la autoridad reguladora. En el caso de las soluciones de disposición final diseñadas expresamente para aceptar fuentes DSRS declaradas desechos, como por ejemplo en una instalación de disposición final en un pozo barrenado, la evaluación de la seguridad y los requisitos de aceptación de desechos deberían ser consonantes para que se permita la disposición final del inventario en cuestión. El cumplimiento de los requisitos de aceptación de desechos supone que la disposición final de estas DSRS es consonante con la evaluación de la seguridad y que la instalación de disposición final en un pozo barrenado ofrecerá la contención y el aislamiento necesarios para proteger a las personas y al medio ambiente.

12.2. OPCIONES DE DISPOSICIÓN FINAL

Con excepción de las DSRS calificadas de desechos exentos o VSLW, las DSRS declaradas desechos deben ser objeto de disposición final en una instalación adecuada a tales efectos. Las opciones de disposición final de las fuentes en desuso y los factores que determinan la selección de una opción apropiada para los diversos tipos de fuentes se examinan en la publicación N^o 436 de la *Colección de Informes Técnicos del OIEA* [48]. Antes se han expuesto estos criterios; las soluciones de disposición final existentes y en funcionamiento se describen brevemente en las secciones siguientes.

12.2.1. Disposición final cerca de la superficie

Hace muchos decenios que se desarrollan y están en funcionamiento instalaciones de disposición final cerca de la superficie aplicables a VLLW y LLW, incluidas las DSRS declaradas desechos en la correspondiente clase de desechos que presenten propiedades consonantes con los requisitos de aceptación de desechos. Están en funcionamiento zanjas no artificiales que tal vez solo sean adecuadas para las fuentes que se hayan desintegrado hasta niveles seguros durante el período de control institucional. El objetivo es velar por que, al término de este período, toda fuente radiactiva ubicada en el repositorio no presente puntos de actividad críticos que pudieran suponer un peligro si el emplazamiento se excavara o sufriera una intromisión de forma involuntaria. En

consecuencia, la concentración de la actividad puede servir de criterio de limitación a efectos de exigir que se examinen detenidamente algunas fuentes DSRS o bultos para la disposición final de desechos que agrupan varias DSRS con fines de su aceptación en determinadas instalaciones cerca de la superficie y, posiblemente, que se impida esa disposición final.

Los repositorios artificiales en cámaras a gran escala cerca de la superficie (con una capacidad de, normalmente, miles de metros cúbicos) (figura 108) tienen objetivos semejantes en materia de contención y también se usan principalmente para VLLW y LLW. Gran parte de estos desechos procede de la explotación de centrales nucleares. El diseño y la función de los repositorios cerca de la superficie se describen en las referencias [78-81]. Sin embargo, puede que esas instalaciones de disposición final no permitan una aceptación de fuentes DSRS apreciablemente mayor en comparación con la disposición final de tipo zanja. De hecho, en los casos en que las barreras artificiales no ofrecen mejor protección ante el riesgo de intromisión posterior al control institucional ni lo reducen, puede que el escenario dirigido a evaluar las consecuencias de la intromisión en el lugar en que se colocan las DSRS sea el factor dominante que condicione los correspondientes requisitos de aceptación de desechos. Así ocurre cuando es probable que las propiedades de las DSRS, su colocación en bultos o la correspondiente estrategia de disposición final presenten puntos de actividad críticos.



Fig. 108. Instalación en Centre de l'Aube (Francia) de disposición final cerca de la superficie para LLW (por cortesía de ANDRA).

Aunque esta circunstancia se comprende bien, la justificación de la seguridad y las características de algunos inventarios de fuentes DSRS han permitido a varios países que cuentan con repositorios de tipo artificial cerca de la superficie llegar a la conclusión de que, dada la existencia de una estrategia adecuada de disposición final, parte del inventario de fuentes DSRS cumple los requisitos de aceptación de desechos de esas instalaciones (por ejemplo, Eslovaquia, Francia y España).

La disposición final de LLW cerca de la superficie comprende las instalaciones ubicadas en un emplazamiento subterráneo excavado demasiado cerca de la superficie para que se den las características de seguridad pasiva a largo plazo exigidas para la disposición final de determinados ILW y HLW. Algunos Estados Miembros como Suecia, Finlandia y Noruega han construido instalaciones de disposición final de desechos radiactivos en grandes cavidades rocosas a una profundidad de varias decenas de metros, por lo general en rocas cristalinas duras, como el granito, para someter LLW a disposición final. La contención aportada por esos repositorios a menudo comprende cámaras masivas de hormigón o silos con barreras artificiales adicionales, como rellenos de arcilla y materiales de sellado. Se trata de una opción de disposición final adecuada para algunas DSRS de actividad más alta, al tener debidamente en cuenta la colocación en bultos y las concentraciones de la actividad adecuadas con arreglo a las características de la roca hospedante y el sistema de barreras artificiales del repositorio.

El repositorio Richard en la República Checa está ubicado en una mina abandonada excavada en piedra caliza y cuenta con licencia para recibir LLW. El repositorio comprende un túnel de acceso principal excavado casi horizontalmente que penetra varios cientos de metros en la ladera. Se hace uso de varias cámaras que parten del túnel

de acceso principal con fines de disposición final de desechos acondicionados en bidones de acero de 200 litros. En esas cámaras han sido objeto de disposición final fuentes de período corto y actividad baja. El repositorio Richard no aceptaba fuentes de Am-Be y Pu-Be u otras que superaran los límites de actividad especificados para un bidón de desechos [82]. Sin embargo, estas fuentes se almacenan en la instalación en contenedores especialmente diseñados en espera de su acondicionamiento y ulterior disposición final en un repositorio geológico apropiado.

En caso de no disponerse de repositorios o de que no sea probable que estos vayan a quedar disponibles próximamente para desechos radiactivos distintos de las DSRS, puede establecerse que las DSRS sean objeto de disposición final en instalaciones de disposición final cerca de la superficie diseñadas específicamente para acoger el volumen de fuentes radiactivas, por lo general pequeño. Estas instalaciones de disposición final diseñadas específicamente para las DSRS presentarían diversos niveles de contención por medios artificiales en función de las características de las fuentes radiactivas que fueran a acoger [48]. Puede que ese tipo de instalaciones de disposición final cerca de la superficie diseñadas con fines específicos no sea adecuado para la disposición final de todo el inventario, en particular de las DSRS de actividad alta, y deberían adoptarse decisiones sobre la base, entre otros factores, de evaluaciones de la seguridad.

En la India, el Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas se encarga de dos instalaciones de ese tipo con fines de disposición final de fuentes selladas: el Emplazamiento para la Gestión de Desechos Sólidos Radiactivos (RSMS) en Trombay y la Instalación de Gestión Centralizada de Desechos (CWMF) en Kalpakkam. Ambas instalaciones llevan muchos años funcionando. Las fuentes destinadas a disposición final se segregan en grupos de fuentes semejantes. De ser necesario, se aplica una reducción del volumen. Las fuentes que presentan fugas vuelven a sellarse y las fuentes más pequeñas se colocan en un contenedor de acero inoxidable y se sellan con soldadura. Las fuentes con ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir y otras fuentes de radiación beta y gamma cuyo período de semidesintegración es inferior a 30 años se someten habitualmente a disposición final.

12.2.2. Disposición final geológica

En muchos países que deben gestionar desechos del sector nucleoelectrico se están preparando repositorios geológicos que constan de cavernas o túneles con diversos tipos de barreras artificiales. Además, también puede estudiarse el uso de minas en desuso o cavernas con fines de disposición final geológica. En ambos casos, su idoneidad debería demostrarse mediante una justificación de la seguridad, y debería cumplirse el proceso reglamentario prescrito. En función de su emplazamiento y su diseño, o a causa de decisiones políticas, puede que determinadas instalaciones de disposición final geológica se limiten a recibir LLW o ILW, mientras que otras serán adecuadas para la disposición final de HLW y combustible gastado declarado desecho. Con independencia de ello, la contención aportada por todos esos repositorios [83] sería más que adecuada para la disposición final de todos los tipos de fuentes radiactivas, de modo que los países con acceso a un repositorio geológico puedan plantearse el almacenamiento de todas las fuentes radiactivas con fines de ulterior disposición final, siempre que lo permitan los requisitos jurídicos y reglamentarios en materia de inventario en un repositorio. Efectivamente, algunos países imponen limitaciones estrictas a los tipos de desechos que pueden ubicarse en determinados repositorios cuya justificación obedece a motivos de políticas y no obligatoriamente a consideraciones relativas a la seguridad y el comportamiento.

Actualmente no hay en funcionamiento instalaciones de disposición final geológica de HLW o combustible nuclear gastado declarado desecho. Sin embargo, existen instalaciones geológicas que aceptan o han aceptado otras clases de desechos radiactivos, y está previsto que durante el próximo decenio surjan más casos. Por ejemplo, la Planta Piloto de Aislamiento de Desechos (WIPP) está ubicada en el Desierto de Chihuahua a las afueras de Carlsbad, Nuevo México (Estados Unidos). Sus operaciones de disposición final comenzaron en marzo de 1999. El repositorio está ubicado en formaciones salinas estratificadas a una profundidad de 650 metros. Se concedió a la instalación una licencia para someter a disposición final los desechos transuránicos generados por el programa gubernamental de defensa. La instalación también tiene licencia para aceptar con fines de disposición final todas las DSRS acondicionadas que contengan ^{241}Am , ^{238}Pu y ^{239}Pu de fabricación en los Estados Unidos.

Otro repositorio, la instalación de disposición final geológica ubicada en una antigua mina de sal en Morsleben (Alemania), se usó con fines de disposición final de LILW, incluidas algunas DSRS. Sin embargo, el tipo de isótopos y los niveles de actividad aceptados a efectos de disposición final estaban rigurosamente limitados [82]. Actualmente Morsleben se encuentra en trámites de obtención de una licencia para el sellado y el cierre.

12.2.3. Disposición final en pozos barrenados y pozos convencionales

En el caso de las fuentes radiactivas en desuso que no son aceptables a efectos de disposición final en repositorios cerca de la superficie, porque su actividad específica inicial supera los criterios de aceptación o porque no se desintegrarán lo suficiente dentro del período de control institucional, puede que sea adecuado someterlas a disposición final a mayor profundidad en instalaciones debidamente emplazadas y diseñadas. En los Estados Miembros cuyos programas nucleares son insignificantes o cuya disponibilidad de recursos es limitada, la disposición final de las fuentes radiactivas en desuso en pozos convencionales y pozos barrenados es una opción prometedora. La disposición final de fuentes DSRS en un pozo barrenado comporta la colocación de desechos radiactivos sólidos o solidificados en una instalación de almacenamiento en estructuras artificiales que comprenda un pozo barrenado de diámetro relativamente estrecho perforado directamente desde la superficie. Conforme a otros conceptos, la disposición final puede tener lugar en pozos convencionales de mayor diámetro. Las instalaciones de disposición final en pozos barrenados y convencionales pueden presentar diversos diseños, con profundidades que van de unas cuantas decenas de metros a varios cientos de metros. Sus diámetros varían de unas cuantas decenas de centímetros a más de un metro [84-86]. El pozo barrenado u ordinario puede llevar un revestimiento, y las fuentes normalmente están contenidas en un bulto artificial rodeado de relleno (figura 109).

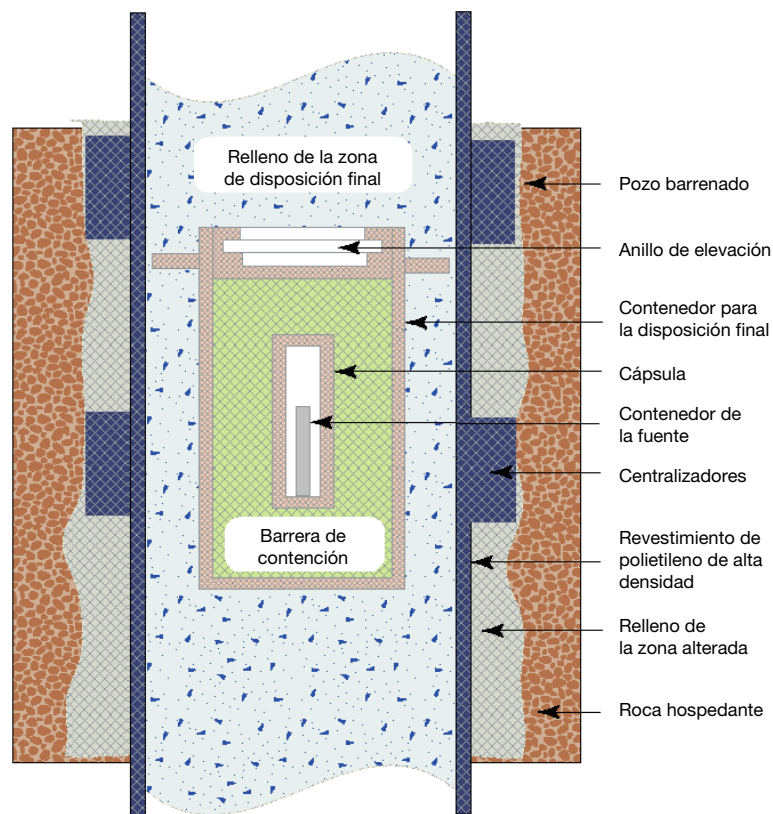


Fig. 109. Ilustración esquemática de los posibles componentes de un sistema de disposición final en pozos barrenados.

Una instalación de disposición final puede constar de un único pozo barrenado o un grupo de ellos que podrán estar ubicados o no junto a otras instalaciones nucleares. El inventario limitado de radionucleidos limita intrínsecamente los posibles peligros para las personas y el medio ambiente. Las instalaciones de disposición final en pozos barrenados presentan varias características favorables que son potencialmente beneficiosas desde los puntos de vista económico y de la seguridad de los desechos, en concreto:

- ofrecen aislamiento a largo plazo respecto de las personas y el medio ambiente para volúmenes pequeños de desechos radiactivos de elevada actividad específica en bultos de desechos de integridad alta;

- permiten un acceso directo y eficaz en relación con el costo a un horizonte geológico adecuado mediante tecnología que ya está disponible;
- necesitan una superficie terrestre limitada y una infraestructura limitada;
- necesitan períodos cortos de construcción, funcionamiento y cierre;
- presentan escasas probabilidades de intromisión humana y de futuros sucesos perturbadores, a causa de la huella pequeña del pozo barrenado y de la posibilidad de seleccionar una profundidad adecuada.

Las barreras naturales y artificiales pueden diseñarse para que ofrezcan seguridad a largo plazo mediante diversas funciones de seguridad que no son indebidamente interdependientes. Ello puede lograrse velando por que las funciones de las barreras artificiales y naturales dependan de procesos físicos y químicos diversos y estén garantizadas por procedimientos de gestión de la calidad. De ese modo, la seguridad general del sistema no debería depender en lo fundamental del rendimiento de un único componente. Pueden consultarse más detalles sobre la disposición final en pozos barrenados en la referencia [48].

En varios países se han utilizado pozos barrenados con fines de almacenamiento y disposición final de desechos radiactivos. Se presenta una reseña sucinta de estas instalaciones en la referencia [81].

Por ejemplo, se ha procedido a la disposición final de fuentes DSRS en pozos barrenados o convencionales excavados en entornos áridos de la zona no saturada en el complejo de instalaciones de disposición final con fines de confinamiento del emplazamiento de ensayo de Nevada, en los Estados Unidos, y en Mt. Walton East, en Australia [87, 88].

Otro ejemplo de ello es la instalación de un pozo barrenado para fuentes DSRS en la Federación de Rusia, concretamente un recipiente cilíndrico de acero inoxidable con un diámetro de 400 mm y una altura de 1500 mm emplazado a una profundidad de 4 m en un pozo de hormigón armado (figura 110). Una mezcla de arcilla y cemento se utiliza como relleno del agujero inicial de construcción en el suelo en torno a la pared de hormigón de la instalación y actúa como precinto impermeable. El diseño de la instalación tiene en cuenta la máxima temperatura permisible generada por las fuentes (unos 230 °C). Para cumplir este requisito la carga máxima de la instalación no puede superar 1,85 PBq (50 000 Ci). La capacidad de las instalaciones de pozos barrenados se aumentó a 6,7 PBq (180 000 Ci) cuando se realizó un acondicionamiento *in situ* con una matriz de metal.

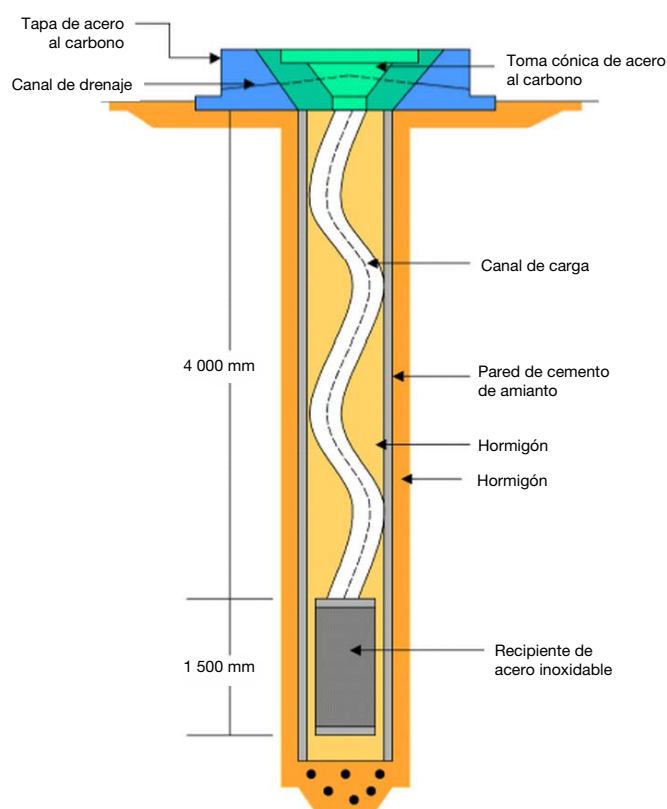


Fig. 110. Diseño de un repositorio de pozo barrenado de tipo radón en la Federación de Rusia.

Actualmente se están planificando como ampliación de una instalación convencional de disposición final cerca de la superficie nuevas instalaciones de disposición final en pozos barrenados que ya han entrado en funcionamiento o se encuentran en fase de planificación [89, 90]. Asimismo, el OIEA, en colaboración con Necsa, de Sudáfrica, ha elaborado un diseño de concepto de disposición final en pozos barrenados pensado específicamente para la disposición final segura de fuentes DSRS [73, 85, 86].

El concepto de disposición final en pozos barrenados (representado esquemáticamente en la figura 111) comporta la colocación de las DSRS en una instalación de almacenamiento en estructuras artificiales barrenada o perforada y controlada directamente desde la superficie. La disposición final en pozos barrenados está pensada fundamentalmente como actividad a pequeña escala que puede llevarse a cabo en ausencia de un programa extenso de investigación científica y de emplazamientos.

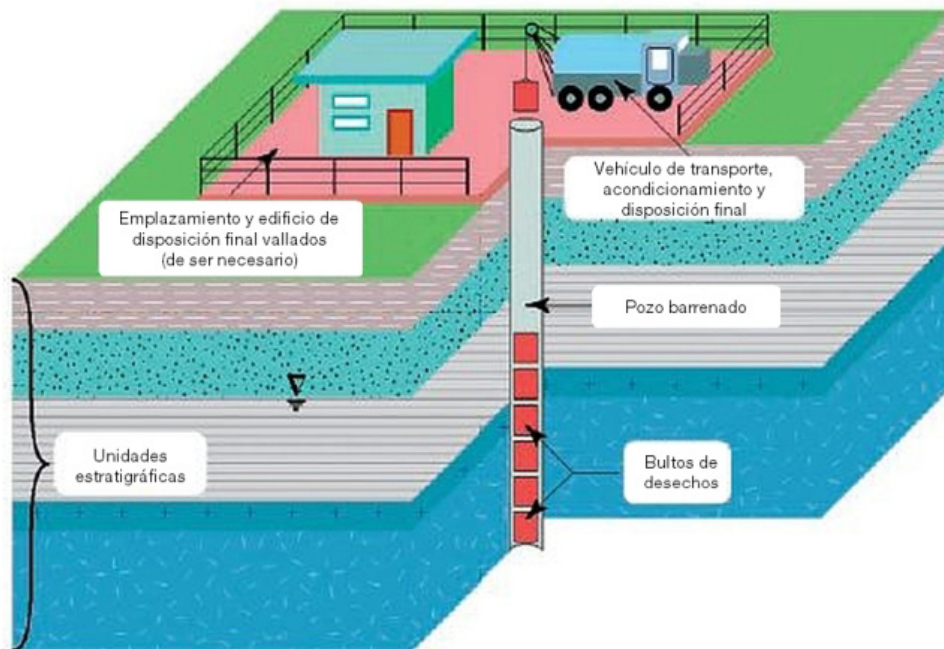


Fig. 111. Representación esquemática de un concepto e instalación de disposición final en pozos barrenados.

Desde la perspectiva de los requisitos de seguridad, la disposición final en pozos barrenados no se diferencia de la disposición final cerca de la superficie o la disposición final geológica de desechos radiactivos. De hecho, en vista de la diversidad de profundidades a las que se accede conforme a enfoques de disposición final en pozos barrenados, normalmente asociadas con la disposición final cerca de la superficie o con la disposición final geológica, se tienen en cuenta elementos de ambas. En cuanto a la disposición final cerca de la superficie y la disposición final geológica, una combinación de barreras naturales y barreras artificiales contribuye a la seguridad de la disposición final en pozos barrenados. Combinadas, estas barreras están diseñadas para contener material radiactivo hasta su desintegración a niveles insignificantes y para ofrecer aislamiento y contención suficientes para garantizar un nivel adecuado de protección de las personas y el medio ambiente [91]. En la referencia [91] figura orientación sobre posibles maneras de organizar las actividades de gestión previa a la disposición final para ofrecer la seguridad operacional y posterior al cierre que se precisa (es decir, maneras de cumplir los requisitos en materia de protección y los criterios conexos especificados) en relación con una nueva instalación de disposición final en pozos barrenados.

12.3. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y ENSEÑANZAS EXTRAÍDAS

12.3.1. Disposición final cerca de la superficie

Muchos Estados Miembros han preparado instalaciones de disposición final cerca de la superficie para VLLW y LLW. Sin embargo, las características de muchas DSRS incumplen los requisitos de aceptación de desechos establecidos para las instalaciones existentes que ya están funcionando. Las características son las siguientes:

- Niveles de actividad: la propiedad básica de las DSRS de categoría 1 y 2 es la elevada actividad residual.
- Elevada actividad específica: un número considerable de fuentes de actividad más elevada supera los límites de actividad específica fijados para que los desechos sean aceptables en instalaciones de disposición final cerca de la superficie en la medida en que podrían dar lugar a dosis de radiación inaceptables en caso de intromisión humana involuntaria.
- Características físicas y químicas: aunque las fuentes selladas son objeto de construcción sólida, no son indestructibles. La forma química de los contenidos radiactivos determina el grado de dispersibilidad y el potencial de migración de radionucleidos.
- Calor y dosis: la elevada actividad específica de una fuente de la categoría 1 puede generar elevadas temperaturas locales localizadas, lo cual puede comportar un descenso de la capacidad de aislamiento de una o más barreras.
- Generación de gases: debe tenerse en cuenta la posibilidad de que se generen gases por radiolisis, productos de la desintegración radiactiva y corrosión.

Varias DSRS no acondicionadas mezcladas con otros desechos han sido objeto de disposición final en instalaciones cerca de la superficie que presentan características del emplazamiento inadecuadas, lo cual ha planteado graves preocupaciones en materia de seguridad a causa de la elevada actividad y el largo período de las fuentes en cuestión. A raíz de estas preocupaciones, las autoridades competentes se han planteado invariablemente la recuperación y rescate de las DSRS de actividad alta y período largo ubicadas en instalaciones de varios países, como Estonia, Hungría y Lituania, en el marco de sus programas de modernización de los repositorios [82].

En Letonia se sometieron a disposición final fuentes DSRS en la instalación de tipo radón de Baldone desde el decenio de 1960 hasta principios del decenio de 1990. Desde entonces ya no está permitida la disposición final de fuentes DSRS, que ahora se están recuperando y trasladando a una nueva cámara de almacenamiento provisional. Las futuras medidas correspondientes a fuentes DSRS que ya han sido objeto de disposición final o están almacenadas dependerán del resultado de una evaluación de la seguridad a efectos de determinar si se precisa de medidas de rehabilitación.

De 1963 a 1988 en Lituania se sometieron a disposición final fuentes DSRS en el repositorio cerca de la superficie de Maišiagala. El repositorio se ha vuelto a clasificar recientemente como instalación de almacenamiento, y de 2004 a 2006 se ejecutó un proyecto de modernización. Está previsto que los desechos sujetos a disposición final se recuperen tan pronto como pueda disponerse de métodos de disposición final geológica.

Las justificaciones de la seguridad de muchas instalaciones de disposición final cerca de la superficie presuponen un período de control institucional (normalmente, de unas cuantas decenas a cientos de años) durante el cual la intromisión humana involuntaria se considera improbable. Sin embargo, incluso dentro de este período, en particular en caso de plazos más prolongados en que las fuentes de actividad alta y período largo no se desintegrarán en suficiente medida, cabe imaginar que el control institucional deje de ejercerse plenamente, con lo que no puede descartarse la intromisión humana involuntaria ni otros peligros radiológicos conexos para los humanos.

12.3.2. Disposición final geológica

El costo de construcción de una instalación de disposición final geológica es elevado. Sería difícil justificar la construcción de esos repositorios en países que apenas tienen unas pocas DSRS de período largo. Se perfilan como posibles soluciones el diseño de una instalación adecuada de disposición final en pozos barrenados o un plan de reparto de responsabilidades de disposición final a escala regional. Esto último plantea cuestiones relativas a la opción de los repositorios multinacionales, como se examina con más detenimiento en, por ejemplo, la referencia [92].

12.3.3. Disposición final en pozos barrenados

El concepto de disposición final en pozos barrenados elaborado por el OIEA específicamente para fuentes radiactivas en desuso [73, 91] constituye, en potencia, una opción de disposición final segura y eficaz en relación con los costos, sobre todo en países cuya infraestructura nuclear es limitada. Resulta especialmente prometedor en los países que solo tienen fuentes DSRS y carecen de otras instalaciones para la disposición final de desechos radiactivos.

Algunas preocupaciones en materia de seguridad vinculadas con la disposición final en pozos barrenados de tipo radón se han mitigado mediante el acondicionamiento *in situ* de fuentes desnudas mediante una aleación de metales con punto de fusión bajo y la introducción de la recuperabilidad en el diseño [93]. Sin embargo, esta práctica, planificada antes a título de disposición final, actualmente se considera almacenamiento.

La Federación de Rusia también ha elaborado un nuevo diseño de contenedores para fuentes radiactivas de período largo que permite recuperar las DSRS subterráneas con fines de transporte al punto de disposición final definitiva. Este contenedor para repositorios incorpora un depósito subterráneo para almacenar fuentes con un volumen de 106 dm³. Está diseñado para almacenar fuentes DSRS cuyo valor de radiactividad total sea de $3,7 \times 10^{14}$ Bq (10 kCi).

La instalación de disposición final de Novi Han, en Bulgaria, ha aceptado fuentes DSRS con fines de disposición final. La licencia de funcionamiento de la instalación se suspendió en 1994 por problemas de seguridad. Posteriormente se puso en marcha un amplio programa de modernización dirigido a mejorar la seguridad del repositorio [82].

Otro ejemplo de disposición final de fuentes selladas en desuso en pozos barrenados es el repositorio de Püspökszilágy en Hungría, ubicado unos 40 km al norte de Budapest en la cresta de una colina. Se ha procedido a la disposición final de los desechos en varias unidades distintas de disposición final cerca de la superficie (cámaras y pozos barrenados) con barreras artificiales. En un principio, la colocación de fuentes DSRS de período largo en pozos barrenados tenía por objeto su disposición final, pero se ha vuelto a plantear el enfoque con fines de almacenamiento en espera de la recuperación antes de la disposición final en un repositorio geológico.

13. JUSTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD

Los Requisitos de Seguridad del OIEA [62, 72] exigen, entre otras cosas, que se prepare una justificación de la seguridad acompañada de la correspondiente evaluación de la seguridad. La justificación de la seguridad consiste en la reunión de argumentos y pruebas científicos, técnicos, administrativos y directivos a favor de la seguridad de una instalación de disposición final, lo cual comprende la idoneidad del emplazamiento y el diseño, la construcción y el funcionamiento de la instalación, la evaluación de los riesgos radiológicos y la garantía de la idoneidad y la calidad del conjunto de labores en materia de seguridad vinculadas con la instalación de disposición final. La evaluación de la seguridad, que forma parte integrante de la justificación de la seguridad, se basa en una valoración sistemática de los peligros radiológicos y es un componente importante de la justificación de la seguridad. Esta última comporta la cuantificación de la dosis de radiación y los riesgos radiológicos que pueden surgir en comparación con los criterios en materia de dosis y riesgos, y permite comprender el comportamiento de la instalación en condiciones normales y en caso de un episodio perturbador teniendo en cuenta los plazos durante los que los desechos radiactivos siguen siendo peligrosos. La justificación de la seguridad y la evaluación de la seguridad complementaria sirven de base a la demostración de la seguridad y a la concesión de licencias. Evolucionarán a medida que evolucione la instalación y servirán de guía y orientación para adoptar decisiones sobre la selección del emplazamiento, el diseño y la explotación. La justificación de la seguridad también servirá de base esencial para el diálogo con las partes interesadas y para el fomento de la confianza en la seguridad de la instalación. Las Guías de Seguridad del OIEA [94, 95] ofrecen orientaciones y recomendaciones a efectos del cumplimiento de los requisitos de seguridad correspondientes a la justificación de la seguridad y la evaluación de la seguridad complementaria con fines de gestión previa a la disposición final y disposición final de desechos radiactivos.

En la referencia [1] se entiende por evaluación de la seguridad la “evaluación de todos los aspectos de una práctica que guardan relación con la protección y la seguridad; en el caso de una instalación autorizada, ello incluye la selección de un emplazamiento, el diseño y la explotación de la instalación”. La evaluación de la seguridad desempeña un papel importante a lo largo de la actividad o la vida útil de la instalación, siempre que los diseñadores, los constructores, los fabricantes, la entidad explotadora o el órgano regulador adoptan decisiones sobre cuestiones de seguridad. En la etapa inicial de desarrollo y utilización de la evaluación de la seguridad se prevé el marco para adquirir la información necesaria a fin de demostrar el cumplimiento de los requisitos de seguridad pertinentes, así como para elaborar y mantener la evaluación de la seguridad a lo largo de la vida útil de la instalación o durante la actividad.

Deben prepararse evaluaciones de la seguridad para las instalaciones y actividades utilizadas con fines de gestión de las fuentes selladas en desuso como flujo de desechos particular, incluidas las actividades de clausura, para demostrar que la seguridad tiene una base adecuada y, en concreto, que esas instalaciones y actividades cumplen los requisitos de seguridad establecidos por el órgano regulador [96]. La evaluación de la seguridad también debería demostrar que los bultos de fuentes DSRS confinarán suficientemente los radionucleidos en la explotación normal y en los incidentes y accidentes postulados.

13.1. PRINCIPIOS DE EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD

En la publicación del OIEA *Principios fundamentales de seguridad* [28] se afirma que el “objetivo fundamental de la seguridad es proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes”. Este objetivo se aplica a todas las instalaciones y actividades dedicadas a gestionar fuentes DSRS, y debe alcanzarse en todas las etapas de su vida útil sin que se limite indebidamente la aplicación de tecnología.

Las etapas de una actividad o de la vida útil de una instalación en las que los diseñadores, la entidad explotadora y el órgano regulador efectúan, actualizan y utilizan evaluaciones de la seguridad comprenden [96]:

- a) la evaluación del emplazamiento de la instalación o actividad;
- b) la elaboración del diseño;
- c) la construcción de la instalación o la ejecución de la actividad;

- d) la puesta en servicio de la instalación o el inicio de la actividad;
- e) el comienzo de la explotación de la instalación o la realización de la actividad;
- f) la explotación normal de la instalación o la realización normal de la actividad;
- g) la modificación del diseño o la explotación;
- h) los exámenes periódicos de la seguridad;
- i) la prolongación de la vida útil de la instalación más allá de la de su diseño original;
- j) los cambios en lo que respecta a los propietarios o el personal directivo de la instalación;
- k) la clausura y el desmantelamiento de la instalación;
- l) el cierre de un repositorio de disposición final de desechos radiactivos y la fase posterior al cierre;
- m) la rehabilitación de un emplazamiento y el levantamiento del control reglamentario.

En el caso de muchas instalaciones y actividades, se requerirán evaluaciones de los impactos ambientales y de los riesgos no asociados con las radiaciones antes de poder iniciar la construcción o ejecución. En general, la evaluación de estos aspectos tendrá muchos elementos en común con la evaluación de la seguridad que se realiza en el caso de los riesgos asociados a las radiaciones conexas. Estas evaluaciones diferentes pueden combinarse con el fin de economizar recursos y de aumentar la fiabilidad y aceptabilidad de sus resultados.

En los *Principios fundamentales de seguridad* [28] figuran diez principios aplicables en el logro del objetivo fundamental de la seguridad. De ello se deriva, entre otras cosas, la justificación para la realización de la evaluación de la seguridad. La interrelación de los *Principios fundamentales de seguridad* y la evaluación de la seguridad se examina detalladamente en la referencia [96], que también establece los requisitos de aplicación general que deberán cumplirse en la evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades, prestándose especial atención a la defensa en profundidad, los análisis cuantitativos y la aplicación de un enfoque diferenciado de las gamas de instalaciones y actividades abarcadas. Esa publicación aborda igualmente la verificación independiente que deben realizar los iniciadores y usuarios de la evaluación de la seguridad. Tiene por objeto proporcionar una base sistemática y coherente para la evaluación de la seguridad de todas las instalaciones y actividades, lo que facilitará la transferencia de buenas prácticas entre las organizaciones que efectúan las evaluaciones de la seguridad.

En la evaluación de la seguridad deben tenerse en cuenta los sucesos relacionados con procesos internos (incendios internos, caídas de bultos de desechos, fallos de contención de los bultos de desechos, fallos de ventilación, falta de corriente, etc.) y los peligros externos (como accidentes aéreos, accidentes de transporte fuera de la instalación, terremotos, tornados e incendios externos).

13.2. PROCESO DE EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD

Los principales elementos del proceso de evaluación y verificación de la seguridad se indican en la figura 112 [96]. Este proceso requiere una evaluación sistemática de todas las características de la instalación o actividad relativas a la seguridad e incluye:

- a) preparativos de la evaluación de la seguridad, es decir, reunir al personal especializado, los instrumentos y la información necesarios para realizar el trabajo;
- b) determinación de posibles riesgos asociados a las radiaciones resultantes del funcionamiento normal, los incidentes operacionales previstos o las condiciones de accidente;
- c) identificación y evaluación de un conjunto exhaustivo de funciones de seguridad;
- d) evaluación de las características del emplazamiento relacionadas con posibles riesgos asociados a las radiaciones;
- e) evaluación de las disposiciones relativas a la protección radiológica;
- f) evaluación de aspectos técnicos para determinar si se han cumplido los requisitos de seguridad correspondientes al diseño relativos a la instalación o actividad;
- g) evaluación de aspectos del diseño y el funcionamiento de la instalación o la planificación y realización de la actividad relacionados con los factores humanos;
- h) evaluación de la seguridad a más largo plazo, que reviste particular interés cuando comienzan a surgir los efectos del envejecimiento y a afectar a los márgenes de seguridad, la clausura y el desmantelamiento de instalaciones, y al cierre de repositorios para desechos radiactivos.

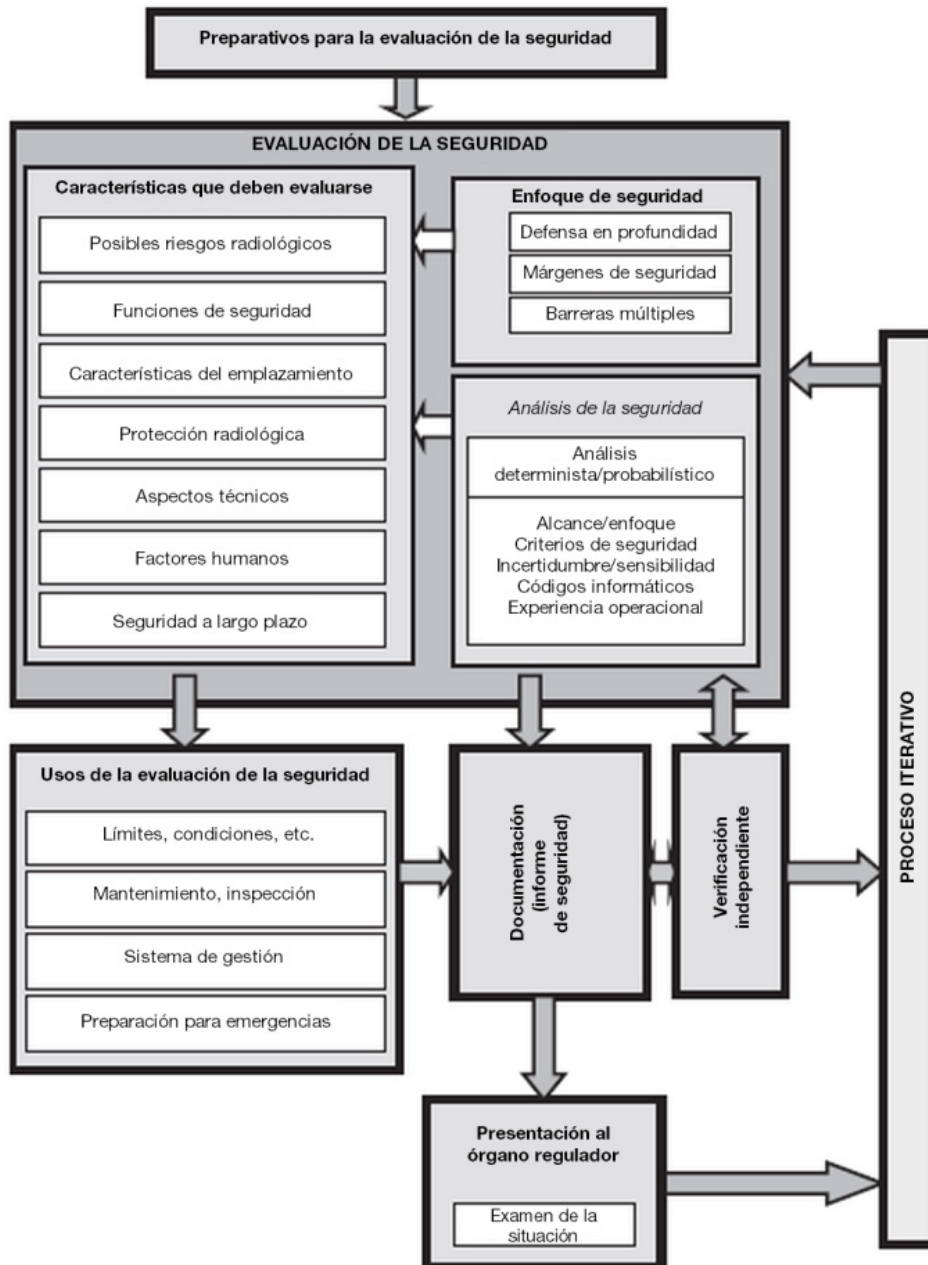


Fig. 112. Visión general del proceso de evaluación de la seguridad [96].

Las evaluaciones de la seguridad deberían realizarse teniendo debidamente en cuenta todos los reglamentos y directrices de seguridad pertinentes para los peligros posibles en cada fase de la gestión de los desechos. La evaluación de la seguridad debería abarcar todas las operaciones y los peligros inherentes vinculados con todos los aspectos de la gestión de desechos radiactivos en la instalación. Puede que también sean necesarias evaluaciones de la seguridad de las prácticas de gestión de desechos fuera del emplazamiento, incluido el transporte de los desechos.

El proceso de evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades debe repetirse, en su totalidad o en parte, según sea necesario, en una fase posterior de las operaciones para tener en cuenta los cambios en las circunstancias (como la aplicación de nuevas normas o las novedades científicas y tecnológicas), la retroinformación sobre la experiencia operacional, las modificaciones y los efectos del envejecimiento. En el caso de las operaciones que continúan por períodos prolongados, las evaluaciones se revisan y repiten las veces que sea necesario. La continuación de esas operaciones está supeditada a que las nuevas evaluaciones demuestren, a satisfacción del órgano regulador, que las medidas de seguridad siguen siendo adecuadas.

En el caso de un repositorio para cantidades importantes de desechos radiactivos, deberán tenerse en cuenta los riesgos asociados a las radiaciones de la fase posterior a la clausura. Los riesgos asociados a las radiaciones tras el cierre de un repositorio pueden surgir a partir de procesos graduales como la degradación de las barreras, y de sucesos distintos que podrían afectar al aislamiento de los desechos, como la intrusión humana involuntaria o cambios abruptos de las condiciones geológicas.

En las evaluaciones de la seguridad debería tenerse en cuenta la gama completa de características de los desechos previstas, al igual que deberían evaluarse los impactos y los efectos ambientales de la explotación normal de la instalación y las posibles condiciones de accidente. Ello comportará la determinación de vías ambientales de transmisión de radionucleidos a los humanos y las exposiciones potenciales. Los valores de los niveles aceptables de todos los efluentes líquidos y gaseosos vertidos al medio ambiente en el marco de las operaciones ordinarias de la instalación deberían obtenerse sobre la base de las exposiciones potenciales. También debería evaluarse la idoneidad del equipo utilizado para vigilar y controlar los niveles de esas descargas. Las evaluaciones de la seguridad deberían revisarse de vez en cuando y actualizarse según proceda sobre la base de la información reunida vigilando el lugar de trabajo y el medio ambiente.

En la referencia [97] figuran recomendaciones sobre la preparación de una evaluación de la seguridad para la disposición final de desechos radiactivos cerca de la superficie. En las referencias [86, 98] se ofrece una sinopsis de las evaluaciones de la seguridad posteriores al cierre y la elaboración de una justificación de la seguridad de las instalaciones de disposición final en pozos barrenados. En la referencia [99] figuran recomendaciones para la elaboración y el examen de evaluaciones de la seguridad de las actividades de clausura.

14. CONCLUSIONES

El informe presenta un examen de las diversas medidas de gestión aplicadas a las fuentes radiactivas en desuso con intención de ofrecer a los Estados Miembros orientación con fines de manipulación, acondicionamiento, transporte y almacenamiento de todo tipo de fuentes DSRS resultantes de aplicaciones nucleares médicas, industriales, de investigación y de otro tipo. Estas directrices, a la vez que cumplen las normas básicas de seguridad y los requisitos de seguridad pertinentes, son un medio entre otros de cumplir estos requisitos. Se espera que el lector tenga en cuenta las condiciones concretas y la situación imperante a fin de conseguir que sus procedimientos y directrices particulares sean efectivos a la luz de sus condiciones y de la infraestructura de que disponga.

Cabe resumir como sigue las conclusiones del presente informe:

- a) Las aplicaciones y características de las fuentes radiactivas selladas utilizadas en la medicina, la industria y la investigación presentan una gran diversidad. En la industria y la medicina se utiliza un gran número de fuentes selladas portátiles, en su mayor parte pequeñas y de actividad baja. En consecuencia, no sorprende que, pese a que se llevan inventarios y se ejercen controles, algunas fuentes se pierdan. La construcción de la mayoría de las fuentes selladas es muy sólida, lo cual explica que los accidentes que comportan pérdidas de fuentes normalmente se deban a errores humanos. Las fuentes de actividad alta no son fáciles de mover, pero presentan un alto riesgo de sobreexposición si no se gestionan debidamente.
- b) Las fuentes deben caracterizarse por completo desde los puntos de vista radiológico, químico y físico como paso previo a una gestión eficaz. La identificación y la caracterización de las fuentes radiactivas selladas no documentadas plantean dificultades. El *Manual de Referencia para la Identificación de Fuentes y Dispositivos Radiactivos* preparado por el OIEA [21] podría servir de instrumento eficaz para identificar las fuentes selladas y los dispositivos conexos.
- c) Todas las actividades relacionadas con el uso y la gestión de fuentes en desuso deberían formar parte del sistema de reglamentación. Una cuestión esencial para el control de la gestión consiste en determinar con precisión cuándo cae en desuso una fuente. Esa tarea resulta sencilla cuando se sustituye una fuente o se cierra una instalación. Sin embargo, el proceso suele ser más gradual (por ejemplo, a medida que una fuente para investigación se utiliza con menor asiduidad). El mayor riesgo de pérdida de una fuente tiene lugar precisamente en esta fase. En los planes de reglamentación debería distinguirse entre fuentes en uso y en desuso. Una manera consiste en exigir que el usuario comunique periódicamente el inventario al regulador presentando listas aparte de fuentes en uso y en desuso. Puede que ello no baste para dar cuenta de las fuentes que caen en desuso gradualmente. En consecuencia, una segunda opción puede consistir en comunicar la fecha en que se utilizó cada fuente por última vez. A continuación, puede fijarse un límite temporal a partir del cual la falta de utilización convierte automáticamente la fuente en “fuente en desuso”.
- d) Debería aplicarse un sistema de gestión moderno que comprenda la manipulación, la colocación en bultos, la capacitación, la auditoría, la evaluación de la seguridad, los requisitos reglamentarios que proceda y los registros en relación con todas las medidas y componentes de una estrategia de gestión de las DSRS.
- e) En función de la situación, las fuentes en desuso podrán devolverse al suministrador o transferirse a otro usuario, ser objeto de disposición final en el país en el que se utilizaron o ser objeto de disposición final en un tercer país dispuesto a aceptarlas. Lamentablemente, las fuentes en desuso a menudo se desechan. Las fuentes desechadas a veces son causa de accidentes. A raíz de esos accidentes, que se producen incluso en Estados Miembros provistos de marcos legislativos y reglamentarios adecuados, se han dado casos de irradiación sufrida por personas, en algunas ocasiones con consecuencias fatales. Así pues, es esencial dotar al órgano regulador de los medios necesarios para controlar efectivamente todas las fuentes principales del Estado Miembro. También es esencial que el órgano regulador se mantenga efectivamente en comunicación con los titulares de las licencias correspondientes a estas fuentes.
- f) La devolución de las DSRS al suministrador, prevista en la *Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos* (referencia [13], artículo 28), es, en principio, una solución válida. Sin embargo, puede que, en la práctica, la legislación del Estado Miembro o las cargas financieras planteen dificultades, por ejemplo cuando haya cesado la actividad del suministrador o el fabricante de las fuentes no exista.

- g) El almacenamiento de las fuentes en desuso en instalaciones del usuario no es ideal desde el punto de vista de la seguridad tecnológica y la seguridad física. Existe cierto riesgo de perder el control de las fuentes en desuso en situación de almacenamiento operacional. El almacenamiento centralizado de las fuentes en desuso reduce las probabilidades de perder el control. El tiempo de almacenamiento por parte del usuario debería reducirse al mínimo, y el usuario y el regulador deberían prestar atención específica al control del acceso, la seguridad física, el mantenimiento de registros adecuados, las responsabilidades individuales y las comprobaciones de rutina (como pruebas de fugas).
- h) Toda segregación que sea necesaria dependerá de la instalación de almacenamiento y de la vía de disposición final definitiva. Se aconseja la segregación de material que sea, en potencia, reciclable o reutilizable. La mayoría de las políticas en materia de segregación tienen en cuenta la tasa de dosis (factor importante en el almacenamiento), el período de semidesintegración y la actividad de los isótopos (factores importantes en la disposición final).
- i) A causa de algunas características de las fuentes en desuso (elevada actividad específica, actividad alta, un período de semidesintegración largo, etc.), muchas fuentes no pueden someterse a disposición final en instalaciones cerca de la superficie. En vista de que todavía no se dispone de un repositorio geológico profundo, la única opción de gestión es el almacenamiento a largo plazo. Una solución prometedora sería la disposición final en pozos barrenados, concepto que se está elaborando actualmente. Hasta que cambie la situación, la mayor parte de los esfuerzos debería centrarse en la preparación adecuada de las fuentes en cuestión con fines de almacenamiento mediante un acondicionamiento adecuado y el aporte de instalaciones de almacenamiento seguras para las fuentes acondicionadas. Las instalaciones de procesamiento centralizado de desechos para varios usuarios pueden ser una opción de gestión eficaz en relación con los costos.
- j) Los operadores encargados de los desechos deberían proceder al tipo de acondicionamiento de las fuentes en desuso que resulte más económico de adquirir y gestionar y cumpla todos los requisitos locales y nacionales. La selección de procesos, especialmente en los Estados Miembros en desarrollo, debería basarse en una tecnología sólida y relativamente sencilla que esté fácilmente disponible, pueda mantenerse sin dificultad y sea adecuada para ocuparse de las fuentes en desuso. Cabe recomendar el uso de cápsulas de acero inoxidable seguido por la soldadura de la tapa para el acondicionamiento de las fuentes de período largo, en vista de la recuperación y el reacondicionamiento ulteriores de las fuentes sujetas a disposición final.
- k) Puede que se precise de desmantelamiento cuando el volumen sea escaso. Solo debería encargarse del desmantelamiento personal debidamente cualificado y experimentado que opere en instalaciones con una contención y un blindaje adecuados. En caso de que no se disponga de ese tipo de instalaciones y experiencia, pueden conseguirse sistemas móviles y equipos de expertos del extranjero, por la vía comercial o a través de programas de asistencia bilaterales o internacionales.
- l) La vía de disposición final debería determinarse antes de la compra de una fuente, momento en el que, de ser posible, también deben concertarse acuerdos comerciales. Al tiempo que este enfoque se está normalizando, muchas fuentes históricas carecen en numerosos países de vías disponibles de almacenamiento provisional y disposición final. La devolución a un fabricante es preferible, por lo general, al envío a un almacén provisional central. Cuando sea posible, debería considerarse la posibilidad de reutilización o reciclado, pero es poco probable que esas vías puedan determinarse en el momento de la compra. Puede que la devolución al fabricante permita acceder a posibilidades de reciclado.
- m) Todas las transferencias de fuentes en desuso a la instalación central de almacenamiento o disposición final deberán cumplir los procedimientos adecuados en materia de gestión de la calidad. El explotador de la instalación central deberá expedir al remitente un certificado de disposición final de la fuente para confirmar la transferencia de la responsabilidad.

REFERENCIAS

- [1] 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] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Nature and Magnitude of the Problem of Spent Radiation Sources*, IAEA-TECDOC-620, IAEA, Vienna (1990).
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *El accidente radiológico de Goiânia*, OIEA, Viena, 1989.
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *El accidente radiológico de San Salvador*, OIEA, Viena, 1991.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Tammiku*, IAEA, Vienna (1998).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Yanango*, IAEA, Vienna (2000).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Gilan*, IAEA, Vienna (2002).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Samut Prakarn*, IAEA, Vienna (2002).
- [9] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Loss of an Iridium-192 Source and Therapy Misadministration at Indiana Regional Cancer Center, Indiana, Pennsylvania, on November 16, 1992*, NUREG-1480, NRC, Washington, DC (1993).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Radiological Accident in Lilo*, IAEA, Vienna (2000).
- [11] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad - Edición provisional, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSR Part 3*, OIEA, Viena, 2011.
- [12] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Colección Seguridad del OIEA N° 115*, OIEA, Viena, 1997.
- [13] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos, Colección de Derecho Internacional del OIEA N° 1*, OIEA, Viena, 1998.
- [14] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Código de Conducta sobre la Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas*, OIEA, Viena, 2004.
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed Radioactive Sources*, IAEA-TECDOC-1145, IAEA, Vienna (2000).
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Conditioning and Interim Storage of Spent Radium Sources*, IAEA-TECDOC-886, Vienna (1996).
- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Management of Spent High Activity Radioactive Sources (SHARS)*, IAEA-TECDOC-1301, IAEA, Vienna (2002).
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Management of Disused Long Lived Sealed Radioactive Sources (LLSRS)*, IAEA-TECDOC-1357, IAEA, Vienna (2003).
- [19] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Métodos para la identificación y localización de fuentes radiactivas gastadas*, IAEA-TECDOC-804, OIEA, Viena, 1997.
- [20] FÖLDIAK, G. (Ed.), *Industrial Application of Radioisotopes*, Akadémiai Kiadó, Budapest (1986).
- [21] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Identificación de fuentes y dispositivos radiactivos, Orientación Técnica, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 5*, OIEA, Viena, 2009.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Radiation Protection: Sealed Radioactive Sources — Leakage Test Methods*, ISO 9978:1992, ISO, Geneva (1992).
- [23] 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.
- [24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Categorization of Radioactive Sources*, IAEA-TECDOC-1344, IAEA, Vienna (2003).
- [25] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Seguridad física de las fuentes radiactivas, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 11*, OIEA, Viena, 2019.
- [26] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Sealed Radioactive Sources: Classification*, ISO 2919:1980, ISO, Geneva (1980).
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources: A Safety Fundamental*, Safety Series No. 120 (1996).

- [28] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMUNIDAD EUROPEA DE LA ENERGÍA ATÓMICA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Principios fundamentales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SF-1, OIEA, Viena, 2007.
- [29] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Marco gubernamental, jurídico y regulador para la seguridad, Colección Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 1, OIEA, Viena, 2010.
- [30] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Seguridad de los generadores de radiación y de las fuentes radiactivas selladas, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° RS-G-1.10, OIEA, Viena, 2009.
- [31] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Control reglamentario de las fuentes de radiación, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GS-G-1.5, OIEA, Viena, 2009.
- [32] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Sistema de gestión de instalaciones y actividades, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GS-R-3, OIEA, Viena, 2011.
- [33] 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.
- [34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Quality Assurance for Safety in Nuclear Power Plants and Other Nuclear Installations, Code and Safety Guides Q1-Q14, Safety Series No. 50-C/SG-Q, IAEA, Vienna (1996).*
- [35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Management System for the Processing, Handling and Storage of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards No. GS-G-3.3, IAEA, Vienna (2008).*
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Management System for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.4, IAEA, Vienna (2008).*
- [37] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, *Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GS-R-2, OIEA, Viena, 2004.
- [38] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Método para elaborar disposiciones de respuesta a emergencias nucleares o radiológicas, Actualización del documento IAEA-TECDOC-953/S, Colección de Preparación y Respuesta para Casos de Emergencia, EPR-METHOD 2003, Viena, 2009.*
- [39] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Disposiciones de preparación para emergencias nucleares o radiológicas, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GS-G-2.1, OIEA, Viena, 2010.
- [40] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre materiales radiactivos e instalaciones conexas, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* N° 14, OIEA, Viena, 2012.
- [41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Surveillance and Monitoring of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Safety Reports Series No. 35, IAEA, Vienna (2004).*
- [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Monitoring of Radioactive Contamination on Surfaces, Technical Reports Series No. 120, IAEA, Vienna (1971).*
- [43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Strengthening Control over Radioactive Sources in Authorized Use and Regaining Control over Orphan Sources: National strategies, IAEA-TECDOC-1388, IAEA, Vienna (2004).*
- [44] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Regulatory Authority Information System (RAIS), (Computer software and instructions manual, Version 2.0), IAEA, Vienna (1999).*
- [45] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Clausura de instalaciones médicas, industriales y de investigación, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-G-2.2, OIEA, Viena, 2010.
- [46] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Estrategia nacional para recuperar el control de fuentes huérfanas y mejorar el control de fuentes vulnerables, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SSG-19, OIEA, Viena, 2013.
- [47] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos: Edición de 2012, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SSR-6, OIEA, Viena, 2013.
- [48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Disposal Options for Disused Radioactive Sources, Technical Reports Series No. 436, IAEA, Vienna (2005).*
- [49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Developing Multinational Radioactive Waste Repositories: Infrastructural Framework and Scenarios of Cooperation, IAEA-TECDOC-1413, IAEA, Vienna (2004).*
- [50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).*

- [51] 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.
- [52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of the Factors Affecting the Selection and Implementation of Waste Management Technologies, IAEA-TECDOC-1096, IAEA, Vienna (1999).
- [53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Locating and Characterizing Disused Sealed Radioactive Sources in Historical Waste, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.17, IAEA, Vienna (2008).
- [54] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados*, OIEA, Viena, 2009.
- [55] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Characterization of Radioactive Waste Forms and Packages, Technical Reports Series No. 383, IAEA, Vienna (1997).
- [56] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization, IAEA-TECDOC-1537, IAEA, Vienna (2007).
- [57] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials, IAEA-TECDOC-855, IAEA, Vienna (1996).
- [58] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Principios para la exención del control reglamentario de prácticas y fuentes de radiación, Colección Seguridad del OIEA* N° 89, OIEA, Viena, 1989.
- [59] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Aplicación de los conceptos de exclusión, exención y dispensa, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° RS-G-1.7, OIEA, Viena, 2007.
- [60] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Reference Design for a Centralized Spent Sealed Sources Facility, IAEA-TECDOC-806, IAEA, Vienna (1995).
- [61] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Interim Storage of Radioactive Waste Packages, Technical Reports Series No. 390, IAEA, Vienna (1998).
- [62] 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.
- [63] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Almacenamiento de desechos radiactivos, Guía de Seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-G-6.1, OIEA, Viena, 2009.
- [64] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development of Specifications for Radioactive Waste Packages, IAEA-TECDOC-1515, IAEA, Vienna (2006).
- [65] ARUSTAMOV, A.E., OJOVAN, M.I., SEMENOV, K.N., SOBOLEV, I.A., Preparation of radium and other spent sealed sources containing long-lived radionuclides to long-term storage (Proc. WM'03 Conf. Tucson, 2003), (2003) CD-ROM.
- [66] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Clasificación de desechos radiactivos, Guía de Seguridad General, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSG-1, OIEA, Viena, 2015.
- [67] OJOVAN, M.I., et al., An Introduction to Nuclear Waste Immobilization, Elsevier, Amsterdam (2005).
- [68] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Radiation Sources and Security of Radioactive Materials (Proc. Int. Conf. Dijon, 1998), IAEA, Vienna (1999).
- [69] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Radioactive Waste Management (Proc. Int. Conf. Córdoba, 2000), IAEA, Vienna (2000).
- [70] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Issues and Trends in Radioactive Waste Management (Proc. Int. Conf. Vienna, 2002), IAEA, Vienna (2003).
- [71] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Security of Radioactive Sources (Proc. Int. Conf. Vienna, 2003), IAEA, Vienna (2003).
- [72] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Disposición final de desechos radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SSR-5, OIEA, Viena, 2012.
- [73] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, BOSS: Borehole Disposal of Disused Sealed Sources. A Technical Manual, IAEA-TECDOC-1644, IAEA, Vienna (2011).
- [74] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories (Proc. Workshop Aix-en-Provence, 1991), OECD, Paris (1992).
- [75] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Microbial Degradation of Low-Level Radioactive Waste, Rep. NUREG/CR-6341, Office of Standards Development, NRC, Washington, DC (1996).
- [76] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal (Proc. Workshop Reims, 2000), OECD, Paris (2001).
- [77] EUROPEAN COMMISSION, PROGRESS Project: Research into Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Repository Systems. Final Report, Rep. EUR 19133 EN, EC, Luxembourg (2000).
- [78] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Considerations in the Development of Near Surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 417, IAEA, Vienna (2003).
- [79] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1256, IAEA, Vienna (2001).

- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and Technical Basis for the Near Surface Disposal of Low and Intermediate Level Waste, Technical Reports Series No. 412, IAEA, Vienna (2002).
- [81] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Considerations in the Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in Borehole Facilities, IAEA-TECDOC-1368, IAEA, Vienna (2003).
- [82] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 433, IAEA, Vienna (2005).
- [83] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Issues Relating to Safety Standards on the Geological Disposal of Radioactive Waste (Proc. Mtg Vienna, 2001), IAEA-TECDOC-1282, IAEA, Vienna (2002).
- [84] PROZOROV, L., TKATCHENKO, A., TITKOV, V., KORNEVA, S., Prospects of Large Diameter Well Construction at ‘Radon’ Sites, HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration — Working Towards a Cleaner Environment, Waste Management 0,1, Tucson (2001).
- [85] VAN BLERK, J.J., VIVIER, J.J.P., PIROW, P., ANDREOLI, M.A.G., HEARD, R.G., The Borehole Disposal Concept for Spent Sources, Volume I: Development and Evaluation of the Concept, NECSA Rep. GEA-1353 (NWS-RPT-00\013), NECSA, Pretoria (2000).
- [86] KOZAK, M.W., STENHOUSE, M.J., VAN BLERK, J.J., The Borehole Disposal of Spent Sources, Volume II: Preliminary Safety Assessment of the Disposal Concept, NECSA Rep. GEA-1353 (NWS-RPT-00\013), NECSA, Pretoria (2000).
- [87] COCHRAN, J.R., et al., Compliance Assessment Document for the Transuranic Wastes in the Greater Confinement Disposal Boreholes at the Nevada Test Site, Vol. 2: Performance Assessment, Rep. Sand 2001-2977, Sandia National Laboratories, NM (2001).
- [88] HARTLEY, B.M., et al., “The establishment of a radioactive waste disposal facility in Western Australia for low level waste”, Nuclear Energy, Science and Technology (Proc. 9th Pacific Basin Nucl. Conf. Sydney, 1994), AE Conventions Pty Ltd, Canberra (1994).
- [89] ANGUS, M.J., CRUMPTON, C., McHUGH, G., MORETON, A., ROBERTS, P.T., Management and Disposal of Disused Sealed Radioactive Sources in the European Union, European Commission Rep. EUR-18186EN, EC, Brussels (2000), <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/68cdcc38-28b6-4252-8aad-99bcc76a4768>
- [90] EUROPEAN COMMISSION, Management of Spent Sealed Radioactive Sources in Central and Eastern Europe (Czech Rep., Estonia, Hungary, Poland and Slovenia), Report EUR-19842EN, EC, Brussels (2001), <https://nuclear.jrc.ec.europa.eu/tipins/contracts/management-spent-sealed-radioactive-sources-central-and-eastern-europe-interim-report>
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Borehole Disposal Facilities for Radioactive Wastes, IAEA Safety Standards Series No. SSG-1, IAEA, Vienna (2009).
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical, Institutional and Economic Factors Important for Developing a Multinational Radioactive Waste Repository, IAEA-TECDOC-1021, IAEA, Vienna (1998).
- [93] OJOVAN M.I., DMITRIEV S.A., SOBOLEV I.A., “Long-term storage and disposal of spent sealed radioactive sources in borehole type repositories”, Waste Management ’03 (Proc. Int. Conf. Tucson, 2003), CD-ROM, p.11.
- [94] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-3, IAEA, Vienna (2013).
- [95] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, IAEA (2012).
- [96] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades, Requisitos de Seguridad Generales, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 4, OIEA, Viena, 2010.
- [97] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÓMICA, *Evaluación de la seguridad para la disposición final de desechos radiactivos cerca de la superficie, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-G-1.1, OIEA, Viena, 2004.
- [98] OJOVAN M.I., GUSKOV A.V., PROZOROV L.B., ARUSTAMOV A.E., POLUEKTOV P.P., SEREBRIAKOV B.E., Safety assessment of bore-hole repositories for sealed radiation sources disposal, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 608, (2000) 141-146.
- [99] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Evaluación de la seguridad para la clausura de instalaciones que utilizan materiales radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-G-5.2, OIEA, Viena, 2012.

ABREVIACIONES

ALARA	tan bajo como sea razonablemente posible
AND	análisis no destructivo
DSRS	fuelle radiactiva sellada en desuso
EW	desechos exentos
HLW	desechos de actividad alta
ILW	desechos de actividad intermedia
ISO	Organización Internacional de Normalización
LDR	baja tasa de dosis
LLW	desechos de actividad baja
NBS	Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación
RAIS	Sistema de Información para Autoridades Reguladoras
VSLW	desechos de período muy corto

Anexo

RIESGOS ASOCIADOS A LAS FUENTES EN DESUSO

Este anexo trata de los riesgos, concretamente los riesgos radiológicos asociados a las fuentes DSRS.

Los accidentes con fuentes en desuso más graves han ocurrido cuando las fuentes acabaron en manos de personas no profesionales que no eran conscientes de estar manejando material radiactivo, dado que el equipo o los portafuentes que contienen fuentes en desuso pueden parecer chatarra normal (véase la figura A-1). La pérdida de control de las fuentes DSRS también puede dar lugar al riesgo de pérdida, robo o apropiación indebida de las fuentes. Una dimensión nueva del peligro que representan las fuentes en desuso es la posibilidad de que puedan ser robadas deliberadamente con fines de uso doloso o tráfico ilícito.

Los accidentes habidos en el pasado han mostrado que la radiación, por su naturaleza e historia, posee una capacidad única para desencadenar miedo y ansiedad entre la población general. No se requiere una cantidad necesariamente grande de material radiactivo para que se deriven consecuencias económicas; aun una pequeña cantidad podría tener grandes efectos psicológicos. La aplicación de medidas de seguridad física apropiadas puede reducir la probabilidad de que se produzcan tales situaciones.

A-1. ASPECTOS QUE INFLUYEN EN LOS RIESGOS ASOCIADOS A LAS FUENTES EN DESUSO

En el caso de las fuentes DSRS, entre las consecuencias de un accidente se podrían incluir, entre otras, una o más de las siguientes [A-1]:

- Contaminación interna o externa de personas y lesiones por radiación conexas (p. ej., eritema, daño tisular, amputación e incluso la muerte) debido a la sobreexposición de las personas.
- Contaminación de material o del medio ambiente debido a la rotura del encapsulamiento y la dispersión del contenido radiactivo de la fuente radiactiva sellada (destrucción del encapsulamiento, fundición con chatarra, etc.).
- Pérdidas económicas imputables a tratamiento médico, vigilancia radiológica relacionada con el accidente, descontaminación, desmantelamiento y gestión y disposición final de desechos, así como los costos derivados de la pérdida de capacidad de producción, la compensación monetaria a las personas sobreexpuestas, los gastos sociales y la pérdida del uso de la fuente en sí.

En términos generales, el riesgo es la posibilidad o probabilidad de que una persona sufra un daño o experimente un efecto perjudicial para la salud si se expone a un peligro, y es una función de la probabilidad (verosimilitud de que un suceso determinado ocurra) y la consecuencia (magnitud de los efectos perjudiciales). En los riesgos asociados a la exposición a las fuentes DSRS influyen las características de la fuente, el ambiente en que se vea afectada la fuente y las acciones de las personas implicadas. Las fuentes radiactivas que contienen radionucleidos de período largo, como ^{241}Am o ^{226}Ra , seguirán siendo potencialmente peligrosas después de miles de años. A la inversa, los radioisótopos de período corto se vuelven seguros en mucho menos tiempo. El decaimiento tras diez períodos de semidesintegración reduce la actividad de la fuente en un factor de alrededor de 1000. La actividad de una fuente de teleterapia con una actividad inicial de 100 TBq de ^{60}Co se habrá reducido hasta alcanzar un nivel más seguro al cabo de 100 años, mientras que para que una fuente de ^{137}Cs con la misma actividad reduzca su actividad hasta alcanzar ese mismo nivel se requieren 600 años y, para una fuente de radiografía de ^{192}Ir , solo 4 años.

Las consecuencias de un accidente que comporte la exposición a una fuente radiactiva sellada son directamente proporcionales a la actividad de la fuente [A-2]. En el caso de una fuente de emisores alfa o beta, el daño causado por la manipulación de una fuente de algunos kBq sería indetectable, pero una fuente similar de algunos TBq podría tener consecuencias mortales (obsérvese que esto se aplica solo a fuentes beta y gamma).



Fig. A-1. Equipo fuera de servicio que contiene fuentes en desuso.

A-2. EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

El efecto de una exposición a la radiación depende del tipo de radiación de la fuente. Cuando la radiación ionizante transmite energía a un tejido vivo es probable que se produzca un daño. Cuanto mayor sea la intensidad de la radiación incidente, mayor será la magnitud del daño. Por consiguiente, es la transferencia o deposición de energía en el tejido vivo lo que determina la magnitud del daño en el tejido y, por ende, de la lesión. La ionización de los tejidos también puede ocurrir como consecuencia directa, como en el caso de la radiación alfa y beta, o indirecta, como en el caso de los rayos gamma y los neutrones. Si bien la radiación alfa tiene una característica de elevada ionización específica, su penetración es muy limitada.

Las características de ionización de la radiación gamma y el haz de neutrones dependen de la energía de estos. Las fuentes de neutrones (p. ej., Am-Be, Ra-Be, Pu-Be) requieren una manipulación especialmente cuidadosa, ya que los neutrones que emiten representan un tipo de radiación más peligrosa. Los neutrones, además, cuando son absorbidos por el medio circundante pueden inducir radiactividad artificial.

Para los efectos deterministas (no estocásticos) en el ser humano, hay umbrales de dosis por debajo de los cuales los efectos específicos no se manifiestan. Una exposición del cuerpo entero por encima de 3 Sv puede ser letal para los seres humanos, y por encima de 7 Sv lo es. Si la exposición solo afecta a una parte del cuerpo, el individuo puede sobrevivir a dosis mayores, pero los daños pueden ser de tal gravedad que podría ser necesario extirpar la parte expuesta. El sistema de categorización de fuentes del OIEA [A-3] se basa en los efectos deterministas.

Las fuentes de la categoría 1, si no se gestionan o no se protegen físicamente de manera segura, probablemente causarán una lesión permanente a la persona que las manipule, o también por contacto con las fuentes durante más

de unos minutos. Probablemente sería mortal estar en estrecha proximidad con un material radiactivo sin blindaje durante un período de entre unos minutos y una hora.

Las fuentes de la categoría 2, si no se gestionan o no se protegen físicamente de manera segura, pueden causar una lesión permanente a la persona que las manipule, o también por contacto con las fuentes durante un breve período (minutos u horas). Posiblemente sería mortal estar en estrecha proximidad con un material radiactivo sin blindaje durante un período de horas o días.

Las fuentes de la categoría 3, si no se gestionan o no se protegen físicamente de manera segura, pueden causar una lesión permanente a la persona que las manipule, o también por contacto con las fuentes durante varias horas. Es muy improbable la exposición de una persona en estrecha proximidad durante más de un par de horas a distancias tan cortas.

Para los efectos estocásticos, mayormente la inducción de cáncer y efectos genéticos, no hay un umbral: el riesgo de efecto se considera proporcional a la dosis. El riesgo de inducción de cáncer potencialmente letal es de $2-4 \times 10^{-2}$ por Sv, mientras que para los efectos hereditarios graves el riesgo es menor, de alrededor de 10^{-2} por Sv. En las referencias [A-4] a [A-8] figura un análisis más completo de los efectos de la radiación ionizante en el ser humano y el medio ambiente.

El tiempo, la distancia y el blindaje son los elementos clave de la protección radiológica y de la reducción de la exposición al mínimo. El riesgo radiológico está vinculado a los mismos elementos. La exposición a la radiación puede causar más daño si las personas son sometidas a exposición durante más tiempo, desde más cerca y con menos material de blindaje entre la fuente y el sujeto. Estos factores hacen que sea difícil causar daños graves a un gran número de personas, porque cuesta poner muchas personas en estrecha proximidad con una fuente durante largo tiempo, y hasta el cuerpo humano en sí mismo proporciona algo de blindaje, de manera que una multitud en cierto modo es un blindaje para una fuente radiactiva. Una única fuente, incluso una grande, podría no tener consecuencias psicosociales o económicas importantes o duraderas.

En el caso de una fuente dañada, el efecto en el medio ambiente puede ser la contaminación de edificios y de la zona en general. La elevada actividad específica del material radiactivo de las fuentes selladas significa que la dispersión en el medio ambiente de cantidades tan pequeñas de su contenido como unos microgramos puede generar un riesgo importante para el ser humano, restringiendo así el uso de los edificios y zonas que posiblemente quedarían contaminados. El costo de la descontaminación puede ser muy elevado. Los accidentes con fuentes en desuso ya han dado como resultado una contaminación del medio ambiente considerable y elevados gastos en los trabajos de descontaminación conexos.

A-3. TOXICIDAD DE LAS FUENTES RADIATIVAS

El envenenamiento de una gran cantidad de personas por los radionucleidos contenidos en las fuentes selladas al objeto de conseguir un impacto sanitario a corto plazo sería difícil, porque en los alimentos, por ejemplo, para tener un efecto determinista sobre cualquier individuo, el material radiactivo tiene que estar presente en una concentración bastante alta. Las bacterias son mucho más eficientes a la hora de causar daño. Así pues, para que haya un gran número de personas afectadas se requiere una gran cantidad de material. Se podría introducir material radiactivo soluble en los embalses, pero las fuentes radiactivas, casi cualquier cantidad de ellas que sea verosímil, quedarían demasiado diluidas como para tener mucho impacto sanitario. El material podría introducirse más cerca del punto de consumo, pero entonces el número de personas afectadas sería reducido. Es posible que un ataque con veneno desencadenase cierta desconfianza en el suministro de alimentos o de agua, pero los brotes de enfermedades de transmisión alimentaria o de transmisión hídrica, puesto que ocurren con algo de frecuencia, en cierto modo resultan familiares. También es posible que si un embalse se contaminase por la presencia de material radiactivo, los consumidores insistirían en que se limpiase el embalse, aun si el material radiactivo no tuviese ninguna consecuencia para la salubridad del agua que llega a los hogares de las personas. Esa limpieza podría tener un costo elevado, pero ese ya no sería un ataque con veneno; sería un ataque por dispersión radiactiva del tipo denegación de uso.

A-4. LA FUNCIÓN DEL DISEÑO DE LA FUENTE

Muchas de las aplicaciones de las fuentes radiactivas requieren que la actividad se concentre en un volumen muy pequeño (*fente puntual*) o se aproxime a la geometría de una línea (*fente lineal*). El volumen del material radiactivo suele ser del orden de un centímetro cúbico o algunos milímetros cúbicos, lo que permite que las dimensiones de la fuente sean muy reducidas, aun cuando el volumen total aumentará como resultado del encapsulamiento.

El material empleado para el encapsulamiento por lo general es acero inoxidable, pero algunas veces también se emplea platino, titanio, aluminio u otros materiales. En las primeras fuentes de ^{226}Ra se utilizaban cápsulas de oro, bronce, plata e incluso vidrio. Los metales preciosos que se usaron para encapsular las fuentes de radio han sido robados por su valor monetario y han pasado a ser la causa de muchos accidentes.

Las fuentes antiguas (especialmente las de radio) se fabricaron con normas menos estrictas de lo que sería aceptable actualmente. La sustancia radiactiva de esas fuentes era una sal, en polvo o bien soluble, que se dispersa fácilmente en caso de que se dañe el encapsulamiento.

A-5. ALGUNOS ACCIDENTES E INCIDENTES RELACIONADOS CON FUENTES EN DESUSO

Con mucha frecuencia, las fuentes en desuso y sus contenedores son recogidos como chatarra valiosa por personas no profesionales. Tales situaciones pueden resultar muy peligrosas. El accidente de Goiânia en el Brasil en 1987 representa uno de esos accidentes, que fue resultado del abandono involuntario de una unidad de teleterapia de ^{137}Cs [A-9]. Ocurrió cuando un instituto privado de radioterapia de Goiânia que se mudaba a unos nuevos locales dejó una unidad de teleterapia de ^{137}Cs sin notificarlo a la autoridad de concesión de licencias, tal como requerían las condiciones establecidas en la autorización del instituto. Los locales antiguos fueron después demolidos parcialmente. El resultado fue que la unidad de teleterapia quedó en condiciones no seguras. Dos personas entraron en los locales y, sin saber qué era esa unidad, pero pensando que quizás tuviese algún valor como chatarra, retiraron el conjunto de la fuente del cabezal de irradiación del aparato. Se lo llevaron a su casa y la cápsula de la fuente se rompió. Posteriormente, los restos del conjunto de la fuente se vendieron al propietario de una chatarrería. Catorce personas fueron gravemente contaminadas; cuatro de ellas murieron y las demás sobrevivieron tras un tratamiento intensivo. Más de 12 000 personas tuvieron que ser monitorizadas para determinar su exposición a la radiación, y en 249 de ellas se halló contaminación interna o externa. Se había producido una grave contaminación ambiental. La rehabilitación de la zona contaminada dio como resultado un volumen total de 3500 m³ de desechos contaminados. Fue necesaria la cooperación internacional para mitigar las consecuencias de ese accidente. El costo directo de la operación de descontaminación y la construcción de dos cámaras de almacenamiento de hormigón para los desechos se estima en 15 millones de dólares.

Otro accidente relacionado con fuentes selladas en desuso ocurrió en 1997 en Georgia [A-10], donde se halló que 11 miembros del personal del servicio militar habían desarrollado una enfermedad cutánea inducida por la radiación. La causa principal del accidente fue el abandono inadecuado y no autorizado de 12 fuentes radiactivas de ^{137}Cs utilizadas anteriormente por el ejército.

Un tercer ejemplo de accidente de esta índole ocurrió en 1994 en Estonia, donde tres personas penetraron en una instalación de disposición final no vigilada y retiraron y se llevaron a su casa una fuente de ^{137}Cs [A-2]. A consecuencia de ello, una persona murió y varios miembros de la familia fueron contaminados, algunos de los cuales presentaban quemaduras inducidas por la radiación.

Otros accidentes están relacionados con la fusión de fuentes en desuso al reciclar chatarra. En todo el mundo ha habido muchos casos en que, de manera involuntaria, se fundieron materiales radiactivos durante el reciclaje de chatarra.

En un accidente ocurrido en México en 1983, en una fundición al norte del país se fundió una fuente de teleterapia de ^{60}Co . Las barras de acero contaminado así producidas se usaron en obras de construcción civil en México y en los EE. UU., dando lugar a la contaminación de varios miles de personas y la demolición de varias casas contaminadas. Un accidente parecido ocurrió en Europa en 1998, cuando se fundió una fuente de ^{137}Cs en una fábrica metalúrgica en el sur de España. La contaminación atmosférica resultante se dispersó durante días hasta que fue detectada en el sur de Francia, en Suiza, en Italia y en el sur de Alemania. También se contaminaron

la acería y dos plantas de procesamiento que recibieron el material incinerado. El órgano español encargado de la seguridad física nuclear ordenó el cierre de esas plantas hasta que se aplicasen las medidas de descontaminación.

A-6. MEDIOS PRÁCTICOS PARA UN RIESGO MÍNIMO

Los componentes infraestructurales relacionados con la reducción del riesgo asociado a la gestión de las fuentes DSRS, a nivel del explotador de la instalación de desechos, pueden resumirse del modo siguiente [A-1]:

- Familiaridad plena con el diseño y las características de las fuentes que se lleven a la instalación para su acondicionamiento o almacenamiento. Esto implica una buena documentación y descripción técnica de todos los tipos de fuentes importadas al país.
- Personal capacitado y experimentado (capacitación inicial y periódica que abarque la protección radiológica, los procedimientos operacionales, los aspectos prácticos de la atención sanitaria y la seguridad, las características de las fuentes, los requisitos reglamentarios, los procedimientos de control de la gestión y los requisitos de la documentación).
- Concesión de licencias (comprendido el cumplimiento de todos los requisitos de la autoridad competente).
- Sistema de gestión (incluidos, entre otros, procedimientos escritos, vigilancia, medidas de seguridad física y planes de emergencia).
- Auditorías periódicas (internas o externas).

REFERENCIAS DEL ANEXO

- [A-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management for the Prevention of Accidents from Disused Sealed Radioactive Sources, IAEA-TECDOC-1205, IAEA, Vienna (2001).
- [A-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Tammiku, IAEA, Vienna (1998).
- [A-3] 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.
- [A-4] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Colección Seguridad del OIEA N° 115*, OIEA, Viena (1997).
- [A-5] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, Ionizing Sources: Sources and Biological Effects, 1982 Report, UNSCEAR, New York (1982).
- [A-6] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 1988 Report, UNSCEAR, New York (1988).
- [A-7] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica 1990*, Publicación ICRP 60, editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) con la autorización de la ICRP, EDICOMPLET S. A., Madrid, 1995, págs. 1 a 3.
- [A-8] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación ICRP 103, editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) con la autorización de la ICRP, Senda Editorial S. A., Madrid, 2008.
- [A-9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *El accidente radiológico de Goiânia*, OIEA, Viena, 1989.
- [A-10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Lilo, IAEA, Vienna (2000).

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN

Ali, Q.	Comisión de Energía Atómica del Pakistán (Pakistán)
Balla, J.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Beer, H-F.	Instituto Paul Scherrer (Suiza)
Benítez-Navarro, J.C.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Berci, K.	EROTERV (Hungria)
Braeckeveldt, M.	Nirond, Organismo Nacional de Desechos Radiactivos y Materiales Fisionables Enriquecidos (Bélgica)
Charette, M-A.	MDS Nordion (Canadá)
Dayal, R.	Consultor (Canadá)
Degnan, P.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Dimitrovski, L.	Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (Australia)
Falvi, L.	Instituto de Isótopos (Hungria)
Fasten, W.	QSA GmbH (Alemania)
Friedrich, V.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Grimm, J.	Departamento de Energía (Estados Unidos de América)
Heard, R.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Hordijk, L.	South African Nuclear Energy Corporation (Sudáfrica)
Kinker, M.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Kohli, A.K.	BRIT (India)
Mayer, S.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Mele, I.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Mendoza Valdezco, E.	Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares (Filipinas)
Mikhalevich, P.	Isotope Technologies (Belarús)
Mourão, R.	Comisión Nacional de Energía Nuclear/Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear (Brasil)
Neubauer, J.	Consultor (Austria)
Niels, Y.	Instituto de Radioelementos (Bélgica)
Novaković, M.	EKOTEH Ltd. (Croacia)
Ormai, P.	Empresa Pública de Responsabilidad Limitada de Gestión de Desechos Radiactivos (Hungria)
Pearson, M.W.	Laboratorio Nacional de Los Álamos (Estados Unidos de América)
Smith, M.	South African Nuclear Energy Corporation (Sudáfrica)
Syed Ahmad, S.H.S.	Organismo Nuclear Malasio (Malasia)

Trifunović, D.

Oficina Estatal de Protección Radiológica (Croacia)

Tsyplenkov, V.

Consultor (Federación de Rusia)

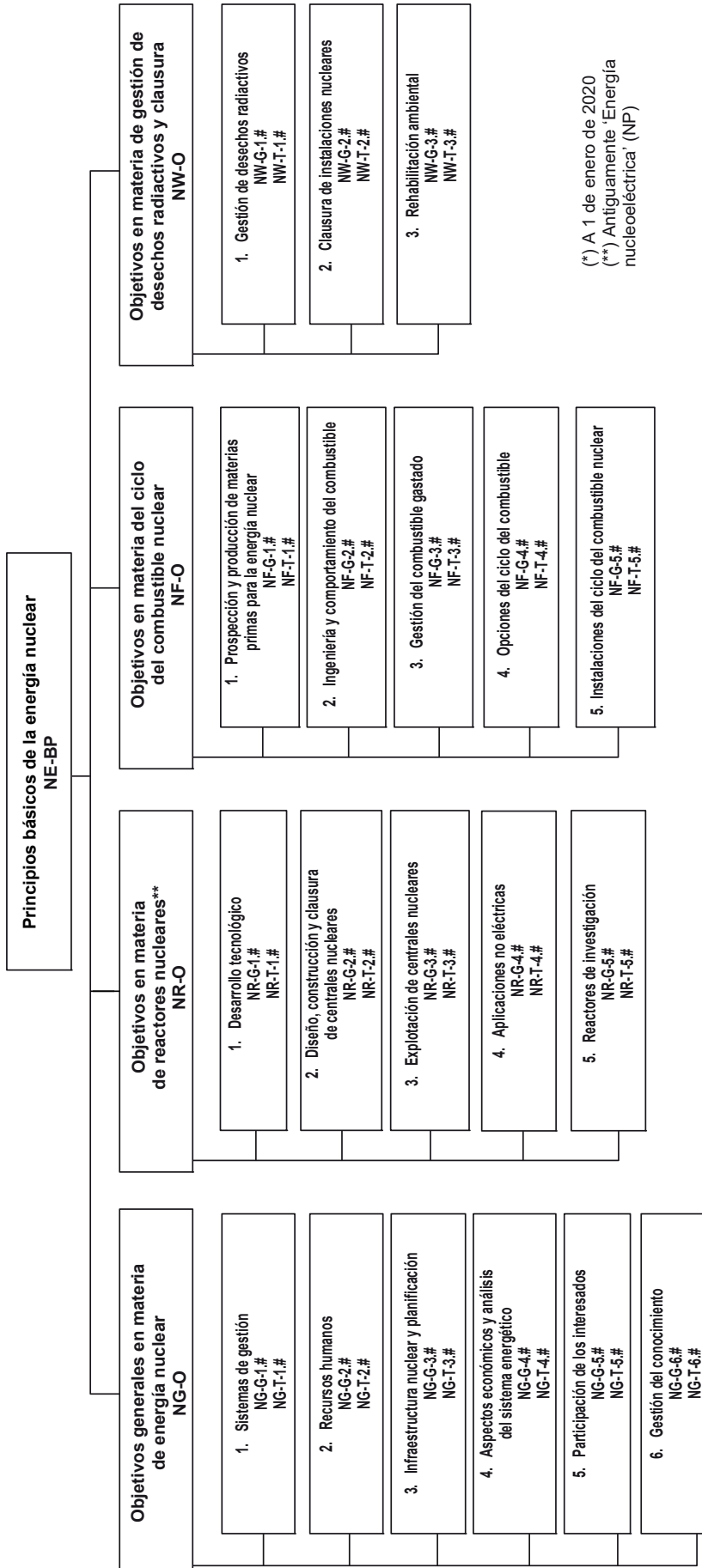
Reuniones de consultores

Viena (Austria): 22 a 26 de noviembre de 2004; 29 de noviembre a 3 de diciembre de 2004;
17 a 21 de octubre de 2005; 31 de mayo a 4 de junio de 2010

Reuniones técnicas

Viena (Austria): 28 de noviembre a 2 de diciembre de 2005; 4 a 8 de septiembre de 2006

Estructura de la Colección de Energía Nuclear del OIEA *



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

Leyenda

- BP:** Principios básicos
- O:** Objetivos
- G:** Guías y metodologías
- T:** Informes técnicos
- 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: order@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: euroman@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**