

TERCER EJERCICIO

B. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

TEMA 13. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES Y  
TRANSPORTE. REQUISITOS DE PR.

## ÍNDICE

<b>1. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Protección radiológica en instalaciones radiactivas industriales.....	2
1.2 Radiografía industrial y gammagrafía .....	4
1.3 Irradiación industrial .....	8
1.4 Medida de densidad y humedad en suelos.....	11
1.5 Control de procesos industriales.....	13
1.6 Análisis instrumental.....	15
<b>2. TRANSPORTE .....</b>	<b>16</b>
2.1 Protección radiológica en el transporte .....	16
2.1.1 Protección radiológica basada en el diseño del bulto de transporte.....	17
2.1.2 Protección radiológica basada en procedimientos administrativos y operacionales .....	19
2.1.2.1 Señalizaciones .....	19
2.1.2.2 Límites de contaminación superficial.....	22
2.1.2.3 Limitación del nivel de radiación en el exterior del medio de transporte .....	22
2.1.2.4 Limitación en la estiba de los bultos en los medios de transporte .....	23
2.1.2.5 Distancias de segregación .....	23
2.2 Programa de Protección Radiológica .....	23
2.2.1 Alcance .....	24
2.2.2 Organización y responsabilidades .....	24
2.2.3 Evaluación de dosis, vigilancia radiológica y optimización .....	25
2.2.4 Segregación y otras medidas de protección .....	26
2.2.5 Respuesta en emergencias.....	26
2.2.6 Formación del personal.....	26
2.2.7 Seguridad física .....	27
<b>3. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>27</b>

## RESUMEN EJECUTIVO

El tema tiene como objetivo describir las diferentes aplicaciones industriales de las radiaciones ionizantes, sus riesgos radiológicos y los criterios y requisitos de protección radiológica a considerar. En relación con el transporte de material radiactivo se explicarán los aspectos de protección radiológica asociados al mismo, considerando en primer lugar la protección intrínseca al diseño de los embalajes y posteriormente aquella que se consigue mediante procedimientos operacionales y el contenido básico de los Programas de Protección Radiológica que deben desarrollar las empresas que realizan este tipo de actividades.

## RELACIONES CON OTROS TEMAS

Este tema está relacionado con los siguientes:

- Tema 5 de la Parte B correspondiente al Tercer ejercicio relativo a la *Protección radiológica ocupacional de los trabajadores expuestos. Principios generales, medidas de protección en el diseño y en la operación de las instalaciones.*
- Tema 16 de la Parte A.2 correspondiente al Primer ejercicio relativo a la *Reglamentación en el transporte de sustancias nucleares y radiactivas. Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA. Reglamento de la Unión Europea sobre Traslado de Sustancias Radiactivas. Reglamento nacional de transporte de mercancías peligrosas por carretera, ferrocarril vía aérea y vía marítima.*
- Tema 33 de la Parte A correspondiente al Tercer ejercicio relativo a la *Seguridad en el transporte de sustancias nucleares y materiales radiactivos.*

## 1. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Desde que en el año 1895 Wilhelm Röntgen experimentando con rayos catódicos descubriese el primer tipo de radiación artificial empleada por el ser humano, los rayos X, muchas han sido las diferentes aplicaciones y técnicas, basadas en las propiedades y los fenómenos de interacción de la radiación con la materia, que se han desarrollado en los diferentes sectores de la sociedad. De hecho, el uso de las radiaciones ionizantes en la industria, la agricultura, la docencia y la investigación constituye un instrumento que permite realizar determinadas tareas de una manera más rápida, eficaz y a un coste menor del que supondría la utilización de otros métodos alternativos.

La aplicación de las radiaciones ionizantes se basa en la interacción de la radiación con la materia y su comportamiento en ella, es decir, como los posibles fenómenos de interacción que ocurren (ionización, excitación, efecto Compton, etc.) se traducen en una alteración de las características del haz de radiación (cuando se realiza una radiografía o se trata de medir el espesor de un material o su densidad y humedad), en una alteración de las características del medio irradiado (cuando se esterilizan productos o para conservar alimentos) o en una alteración de la naturaleza de la radiación seguida de la emisión de radiaciones ionizantes (cuando se emplean técnicas analíticas).

El sector industrial incluye una amplia variedad de instalaciones radiactivas con muy distinto grado de complejidad desde el punto de vista del riesgo radiológico y, por tanto, de su protección radiológica. Por ello, y como se verá más adelante, los requisitos y criterios de protección radiológica a aplicar en cada una de esas instalaciones se pueden dividir en especificaciones comunes a todas las instalaciones y otras definidas en función de la actividad y el tipo de radiación ionizante que se emplee en la instalación.

Por otro lado, es evidente que una de las aplicaciones industriales más extendida es la producción de energía eléctrica, que conlleva en paralelo el desarrollo de una serie de instalaciones de minería, tratamiento del mineral de uranio, fabricación de combustible nuclear, gestión de residuos, etc.; pertenecientes a las denominadas instalaciones radiactivas del ciclo del combustible, que junto con las instalaciones nucleares forman un conjunto de instalaciones industriales que requieren de un tratamiento particular por su importancia y singularidad.

Se pueden clasificar las diferentes aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la industria en función del campo de aplicación:

- Radiografía y gammagrafía industrial.
- Irradiación industrial.
- Medida de densidad y humedad en suelos.
- Control de procesos industriales.
- Análisis instrumental.

Esta clasificación incluye los campos de aplicación más frecuentes en el sector industrial actualmente, pero existen otras posibles aplicaciones relacionadas con la investigación y/o docencia o en el ámbito de la seguridad, entre otros.

Otra posible aplicación industrial es el uso de trazadores, sustancias que se añaden a un sistema para estudiar su comportamiento dinámico. Los radiotrazadores son fáciles de detectar y medir, y permiten observar las reacciones químicas y los procesos físicos, incluso en sistemas cerrados, a temperaturas elevadas y altas presiones, y en tiempo real. Entre sus aplicaciones se encuentran por ejemplo la medida de caudales, la detección de fugas, la localización de obstrucciones y la optimización de los parámetros de procesos.

### 1.1 Protección radiológica en instalaciones radiactivas industriales.

El Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas define lo que se considera “instalación radiactiva” y las clasifica en tres categorías en base al riesgo radiológico, siendo las de primera categoría las de mayor riesgo. Estas instalaciones radiactivas deben disponer de autorización de funcionamiento. El titular de la práctica junto con la solicitud de autorización deberá presentar la documentación recogida en ese Reglamento: Memoria descriptiva, Estudio de Seguridad, Verificación de la Instalación, Reglamento de Funcionamiento, Plan de Emergencia Interior, Previsiones para la clausura y cobertura económica prevista, Presupuesto económico de la inversión a realizar y Plan de Protección Física si es requerido de acuerdo al Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas.

En la memoria descriptiva se describirá el emplazamiento y sus detalles constructivos, el equipo o material radiactivo que haya de emplearse en la instalación, sus sistemas de seguridad, los sistemas de gestión de residuos radiactivos y cualquier otro dato que afecte a la protección radiológica de la instalación. El estudio de seguridad incluirá el análisis y la evaluación de los riesgos que puedan derivarse del funcionamiento en régimen normal de la instalación o a causa de algún accidente. El reglamento de funcionamiento que presente incluirá el organigrama de la instalación, medidas de protección radiológica aplicables, los métodos de trabajo y reglas de manipulación para garantizar la operación segura de la instalación. El plan de verificación de la instalación incluirá las pruebas a que ha de someterse los elementos que incorpora la instalación radiactiva y el plan de mantenimiento previsto. El Plan de Emergencia interior incorporará el Organigrama con funciones y responsabilidades para hacer frente a condiciones de accidente, el plan de actuación antes esas situaciones y las notificaciones a efectuar.

También requieren autorización los cambios y modificaciones recogidos en el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.

Las medidas de protección radiológica establecidas deben garantizar el cumplimiento del principio de optimización y de limitación de dosis, tanto para los trabajadores expuestos de la instalación como para los miembros del público.

El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes establece las normas relativas a la protección de la salud de los trabajadores y de los miembros del público contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes y designa al titular de la

práctica como el responsable de aplicar los principios determinados por él. El titular es, por tanto, responsable del funcionamiento de la instalación en condiciones de seguridad y siempre dentro de lo establecido en los documentos oficiales al amparo de los cuales se concede la correspondiente autorización. Asimismo, recae en el titular la responsabilidad de la instalación en las situaciones de emergencia que pudieran producirse.

En este tipo de instalaciones son de aplicación los principios fundamentales de protección ocupacional establecidos en el RD 1029/2022. Así pues, la protección ocupacional de los trabajadores expuestos debe basarse en:

- La evaluación previa de las condiciones laborales para determinar la naturaleza y magnitud del riesgo radiológico y asegurar la aplicación del principio de optimización.
- La clasificación de los lugares de trabajo en diferentes zonas, teniendo en cuenta: la evaluación de las dosis anuales previstas, el riesgo de dispersión de la contaminación y la probabilidad y magnitud de exposiciones potenciales.
- La clasificación de los trabajadores expuestos en diferentes categorías según sus condiciones de trabajo.
- La aplicación de las normas y medidas de vigilancia y control relativas a las diferentes zonas y a las distintas categorías de trabajadores expuestos, incluida, en su caso, la vigilancia individual.
- La vigilancia de la salud.
- La información y formación.

Serán trabajadores expuestos los que, por las condiciones en las que se realizan su trabajo, puedan recibir dosis mayores de los límites establecidos para personal del público y se clasificarán en dos categorías (A o B) tal y como establece el RD 1029/2022. Por el contrario, se considerará trabajador no expuesto a la persona que por las condiciones en las que se realiza su trabajo, es muy improbable que reciba dosis superior a los límites oficiales establecidos para el público.

El personal que manipule material o equipos radiactivos y el que dirija el funcionamiento de la instalación radiactiva deberá estar provisto de una licencia específica concedida por el CSN, quien establece los campos de aplicación en que deben encuadrarse las actividades del personal con licencia, en base a los diversos tipos de instalación según su finalidad.

- Licencia de supervisor, que capacita para dirigir y planificar el funcionamiento de una instalación radiactiva y las actividades de los operadores.
- Licencia de operador, que capacita para la manipulación de materiales o equipos productores de radiaciones ionizantes, conforme a procedimientos e instrucciones preestablecidos.

Las medidas de protección radiológica operacional a adoptar para las distintas prácticas dependerán, entre otros, de los siguientes factores:

- Tipo de emisor (generador de radiación o fuente radiactiva encapsulada).

- Características radiológicas del emisor (kilovoltaje, miliamperaje y potencia en el caso de generadores de radiación y radionucleido y actividad en el caso de fuentes radiactivas).
- Forma de uso de los equipos (fijos o móviles).

Los generadores de radiaciones ionizantes propios de una instalación radiactiva se pueden clasificar en:

- Aceleradores de partículas.
- Rayos X de alta energía (a partir de 200 kV).
- Rayos X de media energía (de 50 kV a 200 kV).
- Rayos X de baja energía (de 5 kV a 50 kV).

Mientras que, para el caso de fuentes radiactivas se pueden emplear diferentes criterios, como por ejemplo la categorización de fuentes radiactivas que establece la OIEA (Norma de Seguridad RS-G-1.9) que clasifica las fuentes radiactivas en función del potencial riesgo de causar daño a las personas:

- Grupo 1 Extremadamente peligrosas.
- Grupo 2 Muy peligrosas.
- Grupo 3 Peligrosas.
- Grupo 4 Poco Peligrosas.
- Grupo 5 Muy poco peligrosas.

A continuación, se describen los diferentes campos de aplicación de las radiaciones ionizantes en la industria definidos en el apartado anterior y sus requisitos de protección radiológica específicos.

## 1.2 Radiografía industrial y gammagrafía

La radiografía industrial es un método que permite inspeccionar los materiales a fin de detectar defectos no visibles mediante la capacidad de penetración de diversos materiales que poseen los rayos X de onda corta, los rayos gamma y los neutrones. Se trata de un elemento importante de los ensayos no destructivos.

En los ensayos no destructivos, la radiografía industrial se emplea para inspeccionar, entre otros, el hormigón y gran variedad de soldaduras, como las de gasoductos y tuberías de agua, los depósitos de almacenamiento y los elementos estructurales, y permite detectar grietas o defectos que de otro modo pueden no ser visibles. Estas características han hecho de los ensayos no destructivos un instrumento fundamental para el control de calidad, la seguridad y la fiabilidad.

Se pueden emplear tres tipos de equipos, gammágrafos (incorporan una fuente radiactiva encapsulada que emite radiación gamma), equipos convencionales generadores de rayos X y aceleradores que producen rayos X más energéticos que los generadores de rayos X convencionales.

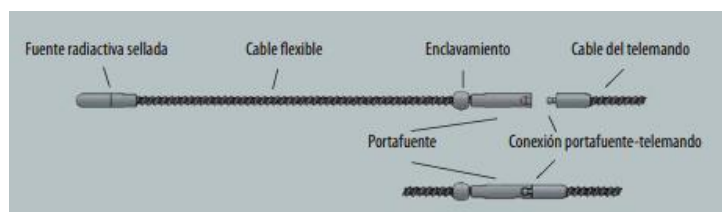
Los equipos de rayos X utilizados en esta técnica tienen una diferencia de potencial de 120 a 450 kV e intensidades de 20 a 200 mA, pudiendo trabajar en una instalación fija o de forma móvil.

Los aceleradores de electrones requieren siempre de una instalación blindada y con enclavamientos de seguridad diseñada para este uso. En este caso, los electrones chocan contra un blanco produciendo rayos X denominados “duros”, que poseen un poder de penetración muy superior a los equipos de rayos X convencionales.

Dentro de esta aplicación también se encuentran los equipos para inspección de contenedores de grandes cargas, dentro del campo de la seguridad. Se trata de escáneres móviles para inspección de grandes contenedores o cargas, constituidos básicamente por un acelerador de electrones de alta energía (hasta 6 MeV), detector y módulo de control y adquisición de datos. Durante el proceso de escaneo, los rayos X de alta energía generados en el acelerador lineal de electrones, penetran en el contenedor escaneado y alcanzan el detector. El escáner tiene forma de pórtico móvil y puede ir montado sobre unos raíles fijados al suelo o sobre un vehículo. En el primer caso el arco del escáner se desplaza a lo largo del contenedor que se desea inspeccionar (parado durante la inspección). En el segundo caso, el vehículo que soporta el arco del escáner se mueve a lo largo del contenedor a inspeccionar. En este tipo de instalaciones es muy importante la vigilancia del acceso a la zona restringida. Para ello se contará con una persona con licencia de operador o sin licencia, pero con formación en protección radiológica para efectuar dicha tarea. Deberán disponer de detectores de radiación adecuados para realizar la vigilancia radiológica, tanto fijos como portátiles, además de otros elementos de vigilancia y protección individual, tales como, blindajes, enclavamientos, indicadores visuales y acústicos, interruptores de emergencia, elementos de acotación y señalización,

Si comparamos los equipos de rayos X o los aceleradores frente a los gammágrafos, tal y como veremos a continuación, estos últimos presentan un riesgo adicional ya que incorporan fuentes radiactivas y, por tanto, requieren medidas de control para el almacenamiento y el transporte de las fuentes, y también para garantizar que la fuente radiactiva vuelva a la posición de seguridad una vez finalizada cada exposición.

Los gammágrafos poseen un contenedor blindado donde se aloja una fuente radiactiva (emisor gamma) ensamblada en un portafuentes, que, junto al telemando y las mangueras, completan el dispositivo. Estos equipos se pueden utilizar en un bunker de radiografía con enclavamientos (de forma fija) o en el lugar donde se encuentra la pieza a radiografiar (radiografía móvil).



El diseño de estos equipos y de sus accesorios, así como los ensayos que deben superar, deberá ajustarse al cumplimiento de la norma ISO 3999 o norma equivalente.



Las fuentes radiactivas normalmente son fuentes doblemente encapsuladas y según la reglamentación de transporte se trata de material radiactivo en “forma especial”, mientras que los contenedores se corresponden con bultos de transporte tipo B(U) o tipo A (ver apartado 2.1.1).

Los radionucleidos más utilizados son Ir-192, Co-60 y Se-75 y muy esporádicamente Yb-169. Todas ellas son fuentes encapsuladas de alta actividad (categoría 2 de la OIEA, excepto alguna que puede ser categoría 3). En el caso de las fuentes encapsuladas empleadas tienen que ajustarse al cumplimiento de la norma ISO 2919.

Los contenedores suelen disponer de un blindaje de uranio empobrecido e incorporan dispositivos de seguridad que permiten bloquear la fuente en su interior e impedir su desplazamiento desde su posición de seguridad hasta que se haya efectuado una correcta conexión entre el contenedor y el telemando y las mangueras. El telemando permite, a distancia, posicionar la fuente en el punto de trabajo. Es un cable flexible dentro de una manguera cuyo accionamiento es manual o automático. Estos últimos incorporan dispositivos programables que permiten fijar el tiempo de exposición (la fuente retorna automáticamente a posición de seguridad al finalizar la exposición) y fijar un tiempo de retardo para el inicio de exposición de la fuente, lo que permite al operador protegerse frente a la radiación.

Las mangueras conectadas a la salida del contenedor gammagráfico permiten el recorrido de la fuente hasta el punto de trabajo. Acoplado al extremo de la manguera puntal se coloca un colimador que permite reducir significativamente la dosis fuera del punto de interés y, en consecuencia, a los trabajadores.

Los equipos denominados *crawler* son una clase de equipos de radiografía diseñados para trabajar en el interior de largas conducciones o tuberías. Pueden realizar de forma continua radiografías de soldaduras en gaseoductos u oleoductos. Constan de un vehículo autopropulsado donde va acoplado un contenedor que alberga una fuente radiactiva encapsulada (normalmente Iridio-192) o un generador de rayos X. Su funcionamiento es automático y responde a una secuencia lógica iniciada o detenida por el operador mediante el accionamiento de un sistema de control remoto basado en un contenedor blindado que incorpora una fuente radiactiva, usualmente de Cs-137. El operador va situando el control remoto en la posición que se va a radiografiar de forma que al llegar el *crawler* a esa posición se detiene y comienza a radiografiar.

Las instalaciones de gammagrafía industrial habitualmente requieren tener autorizado un Plan de Protección Física con los requisitos recogidos en la Instrucción IS-41 del Consejo de Seguridad Nuclear.

Los trabajos de radiografiado se pueden realizar en instalaciones diseñadas al efecto o búnker (radiografía fija) o *in situ*, en el lugar donde se encuentre la pieza a radiografiar (radiografía móvil).

En el primer caso, al tratarse de un espacio cerrado, con unas características constructivas de blindaje específicas para contener la radiación ionizante, su diseño debe proporcionar suficiente protección tanto para los trabajadores expuestos como

para el público. Estos recintos estarán provistos de dispositivos de señalización y enclavamientos de seguridad para controlar el acceso a su interior. El puesto de control se ubicará en el exterior del recinto blindado. Se debe priorizar la realización de radiografía industrial en búnker, sólo se considerará justificada la radiografía o gammagrafía *in situ* cuando no sea factible su realización de forma fija. Los equipos que incorporan fuentes radiactivas de Co-60 se deben utilizar siempre en el interior de un bunker de radiografiado.

Para considerar adecuado el sistema de seguridad de un búnker, éste deberá disponer de un circuito de seguridad que cumpla las siguientes funciones:

- Evitar la entrada de personas al búnker durante una irradiación mediante enclavamientos de puertas y accesos.
- Permitir la salida a cualquier persona que accidentalmente hubiera quedado en el interior del búnker durante la irradiación.
- Advertir a los usuarios de un nivel de radiación que está por encima del nivel de tarado de alguna de las sondas medidoras de radiación ubicadas en el interior del búnker.
- Desbloquear los dispositivos de seguridad en los accesos al búnker cuando la fuente pase a posición de seguridad o cese la emisión de rayos X.

Además, los enclavamientos de seguridad garantizarán que las puertas y/o accesos al búnker no puedan abrirse desde el exterior cuando esté expuesta una fuente radiactiva o se estén emitiendo rayos X, pero al menos una de las puertas debe de poder abrirse desde el interior para permitir la salida del personal que accidentalmente se hubiera quedado en el interior.

Este tipo de recintos blindados deben disponer de sistemas de seguridad que impidan la emisión de radiación bajo ciertas circunstancias, bloqueos/aperturas de puertas, paradas de emergencia, señalizaciones, alarmas, enclavamientos y sistemas de detección de la radiación fijos, de tal manera que se garantice la seguridad del personal. En este sentido, el CSN, mediante una instrucción técnica complementaria emitida en el año 2021, especificó las medidas de protección radiológica a realizar por parte de las instalaciones radiactivas de radiografía y gammagrafía.

La radiografía móvil presenta unas dificultades añadidas como su frecuente realización en horario nocturno (con el consiguiente aumento del riesgo por cansancio o sueño), las condiciones de iluminación no siempre son adecuadas, las zonas específicas a radiografiar suelen encontrarse en zonas de difícil acceso e implican complejas condiciones de trabajo, etc.

En este caso, es de especial importancia la formación del personal de operación, la adecuada planificación de los trabajos por el responsable de protección radiológica y la disponibilidad de procedimientos detallados de actuación, tanto en operación normal como de emergencia. La principal herramienta de protección radiológica será la correcta aplicación de los procedimientos.

El personal que dirige el funcionamiento de la instalación dispondrá de licencia de Supervisor y los usuarios de los equipos de licencia de operador. En algunos casos,

como en la gammagrafía móvil, existirá la figura del ayudante, persona sin licencia, pero con formación en protección radiológica. Los trabajadores expuestos se clasificarán como categoría A, salvo si se trabaja en búnker o en el caso de inspección de contenedores de grandes cargas, pudiéndose clasificar como categoría B.

Para la gammagrafía industrial de forma móvil y con equipos tipo *crawler* se dispondrá de dosimetría personal y dosimetría operacional de lectura directa. Cualquier operación de radiografía precisa disponer de un equipo de detección y medida de la radiación para realizar la vigilancia radiológica ambiental y la acotación de las zonas en el caso de operaciones móviles. Cuando los equipos radiactivos se emplean de forma móvil se debe emplear un detector de radiación adecuado por equipo. Además, se dispondrá de equipamiento auxiliar adicional como blindajes, colimadores y elementos de acotación y señalización.

Una complicación añadida a este tipo de instalaciones es la posibilidad de las mismas de disponer de diferentes delegaciones en distintos emplazamientos. Esto dificulta la organización de la protección radiológica en estas instalaciones. Además, suelen disponer de recintos fijos para el almacenamiento de los equipos radiactivos y recintos provisionales a pie de obra. En ambos casos, se deben cumplir los requisitos de seguridad.

Respecto a la gammagrafía industrial, la Guía de Seguridad 5.14 (Rev. 1) del CSN establece las recomendaciones en materia de seguridad y protección radiológica para tales instalaciones, requisitos de equipos y fuentes, para las instalaciones fijas, recintos de almacenamiento, etc.

### 1.3 Irradiación industrial

La irradiación industrial se utiliza esencialmente en las aplicaciones cuya finalidad es producir alteraciones en la materia, mediante radiaciones ionizantes, como consecuencia de los fenómenos de ionización, formación de radicales libres y excitación molecular que se producen al incidir la radiación sobre la materia.

Los cambios producidos en la materia, cuando se irradia de forma controlada, son cambios buscados y útiles, tales como la mejora de sus propiedades físicas, inhibición de la reproducción celular de microorganismos y la esterilización, entre otros.

Las aplicaciones de la irradiación industrial más usuales o demandadas son: esterilización, higienización y conservación de productos médico-quirúrgicos, farmacéuticos, de laboratorio y cosmética, así como conservación de alimentos, mejora de las propiedades térmicas y mecánicas de plásticos, corchos y coloración de vidrios

La esterilización de productos sanitarios y material médico es una tecnología en pleno desarrollo en los países más avanzados, tanto con irradiadores con fuentes radiactivas como con aceleradores de partículas. Es una técnica muy bien aceptada internacionalmente, debido a su eficiencia frente a técnicas en las que se emplean altas temperaturas o productos químicos convencionales, ya que se trata de un

método limpio, sencillo, económico y seguro, basado en las propiedades biocidas de las radiaciones ionizantes.

La finalidad de la irradiación de alimentos es mejorar su conservación y su calidad sanitaria, como medio para garantizar el abastecimiento seguro y suficiente de alimentos, y promover el comercio internacional. Según el *Codex alimentarius*, la energía de la radiación suministrada a los alimentos debe garantizar la ausencia de reacciones nucleares en los mismos ( $E < 5\text{MeV}$  para radiación gamma y  $E < 10\text{MeV}$  para electrones acelerados).

Los plásticos irradiados se vuelven más duraderos, fuertes y resistentes al fuego, debido a la formación de radicales libres en las cadenas de los polímeros y a su posterior reticulación. Este efecto es usado, entre otras aplicaciones para: aumentar la adhesión de *composites* en la industria aeronáutica, el secado de tintes en técnicas de xerografiado, el vulcanizado de neumáticos en la industria automovilística, etc. Un caso singular de este tipo de procesos es la vulcanización del látex mediante radiaciones ionizantes, que sustituye a los métodos químicos, que conllevan problemas alérgicos de los usuarios de productos de utilización muy difundida, tales como guantes, chupetes, juguetes, preservativos, fibras elásticas, etc.

Existen otras muchas aplicaciones de la irradiación industrial, tales como la desinsectación de maderas, la conservación de libros antiguos, la esterilización de insectos para el control de plagas, la irradiación de embalajes vacíos, etc.

Las técnicas de irradiación más utilizadas comercialmente tienen como emisores radiactivos fuentes radiactivas emisoras de radiación gamma de alta energía, principalmente Co-60 y Cs-137 o aceleradores de electrones de alta energía.

Ambas técnicas presentan ventajas e inconvenientes, como:

- Las fuentes radiactivas emiten radiación gamma de forma continua en un arco de  $360^\circ$ , mientras que los aceleradores producen un haz unidireccional de electrones de alta energía.
- La radiación gamma tiene mayor poder de penetración que el haz de electrones, por lo que los aceleradores son más útiles sobre productos delgados o poco densos.
- Las fuentes radiactivas presentan mayores problemas de protección radiológica, la necesidad de recambio de la fuente por decaimiento y su gestión como residuo.

Para evaluar el diseño de este tipo de instalaciones se toma como referencia la guía SSG-8 del OIEA "Radiation Safety of Gamma, Electron and X-Ray Irradiation Facilities" que establece una clasificación por categorías de los distintos tipos de irradiadores de alta energía: 4 categorías para los irradiadores con fuentes y 2 para los aceleradores.

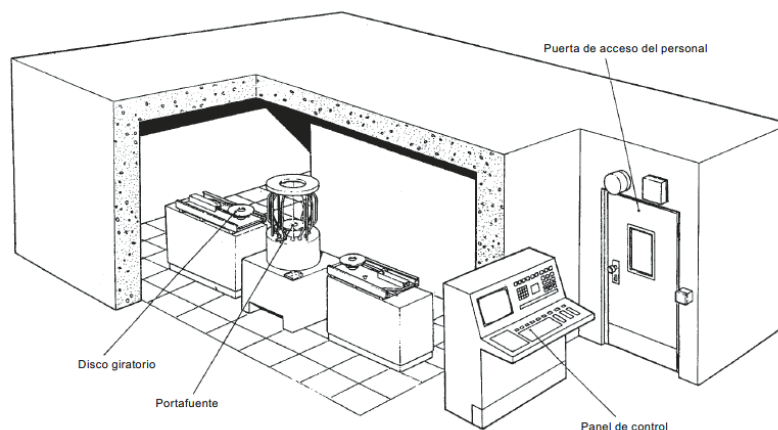
Los irradiadores con fuente radiactiva (éstas deben cumplir con lo requerido en la norma ISO 2919) pueden ser de Categoría I, II, III y IV, en función del diseño de la instalación y en concreto, de la accesibilidad y el blindaje de la fuente radiactiva:

- Categoría I: Son irradiadores en los que la fuente radiactiva se encuentra completamente encerrada en un contenedor seco, que al mismo tiempo actúa como blindaje. El acceso humano a la fuente radiactiva es físicamente imposible debido a su diseño.
- Categoría II: Son irradiadores en los que la fuente radiactiva se encuentra dentro de un recinto seco y sólido, que dispone de un control de acceso para el personal. Cuando la fuente no está en uso, se encuentra totalmente blindada, pero cuando la fuente está en posición de trabajo, se hace inaccesible para el personal mediante un sistema de control de accesos.
- Categoría III: Son irradiadores en los que la fuente radiactiva se encuentra dentro de una piscina con agua que la blindada en todo momento y donde el acceso de personal a la fuente está físicamente restringido, tanto por diseño como por modo de uso. La fuente nunca se saca de la piscina, los productos a irradiar se introducen en la piscina.
- Categoría IV: Son irradiadores en los que la fuente radiactiva se encuentra dentro de una piscina con agua que la blindada cuando no están en uso y dispone de control de accesos para el personal. Cuando el irradiador está en marcha, la fuente se encuentra fuera de la piscina, se sitúa en posición de irradiación, y la fuente y zona de irradiación se hacen inaccesibles mediante el sistema de control de accesos.

Estas instalaciones, en función de la actividad de la fuente radiactiva, pueden requerir de la autorización de un Plan de Protección Física, con los requisitos recogidos en la Instrucción IS-41 del Consejo de Seguridad Nuclear.

Los irradiadores con generador de radiación pueden ser de dos categorías, en función del diseño de la instalación:

- Categoría I: Son irradiadores que constan de una unidad integralmente blindada, con enclavamientos de seguridad que hacen que el acceso al recinto de irradiación sea físicamente imposible. Los aceleradores de electrones y los irradiadores de rayos X utilizados en esta categoría suelen ser de energías del rango de keV, para energías superiores a 500 keV resulta más económico construir un recinto blindado de hormigón.
- Categoría II: Son irradiadores que constan de un acelerador de electrones o de un irradiador de rayos X dentro de un habitáculo blindado y disponen de un sistema de control de accesos que les hace inaccesibles durante la operación de irradiación. Se utilizan con energías menores de 10 MeV, para aceleradores de electrones y menores de 5 MeV para irradiadores de rayos X, con el fin de evitar la activación de los materiales a irradiar y de los materiales de la propia máquina.



Instalación de irradiación gamma de categoría II: Irradiador panorámico de almacenamiento en seco de la fuente

Respecto al diseño y uso de estas instalaciones de irradiación, esencialmente, están constituidas por una cámara de irradiación de productos, blindajes biológicos contra la radiación, sistemas de movimiento de productos, sistemas de control de acceso a la zona de irradiación y un panel de control. Deben construirse de forma que, durante su uso normal, las dosis de radiación que reciban los trabajadores sean tan bajas como razonablemente sea posible, y el público reciba dosis insignificantes.

En estas instalaciones las dosis producidas en el recinto de irradiación son muy elevadas, tanto que si una persona se encontrara accidentalmente en su interior durante la irradiación podría recibir, en un periodo de tiempo muy corto, una dosis letal. Para evitar el riesgo de exposiciones accidentales se adoptan unos estrictos requisitos en el diseño y la construcción de la fuente radiactiva y de su soporte, los blindajes biológicos, los enclavamientos y los sistemas de seguridad, que impidan el acceso al recinto de irradiación cuando la fuente está en uso, además de señalizaciones y alarmas. Todo esto se complementa con procedimientos específicos de trabajo y se extrema la formación y el entrenamiento del personal.

En su diseño se adoptan los principios de diseño seguro, que implican la defensa en profundidad, la redundancia y la diversidad.

El uso adecuado del detector de radiación se convierte en estas instalaciones en una herramienta fundamental a la hora de entrar en la cámara de irradiación, cuando los sistemas de seguridad permiten el acceso tras una operación.

El personal que dirige el funcionamiento de la instalación dispondrá de licencia de supervisor y los usuarios de los equipos de licencia de operador. En el caso de irradiadores con fuentes radiactivas los trabajadores expuestos se clasificarán como categoría A, portando dosimetría personal, mientras que, si se trata de irradiadores con aceleradores de electrones o rayos X, el personal se podría clasificar como categoría B, siendo recomendable el uso también de dosimetría personal.

#### 1.4 Medida de densidad y humedad en suelos

Otra de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes es la medida in situ de la densidad y humedad en suelos, bien mediante sondas de testificación, a las que se

incorporan fuentes radiactivas encapsuladas, o utilizando equipos que ya las llevan incorporadas en su interior. En ambos casos se trata de dispositivos móviles que se transportan al lugar de trabajo y les aplica la reglamentación de transporte de material radiactivo.

Las sondas se utilizan en prospecciones geofísicas a gran profundidad. La actividad de las fuentes radiactivas es mayor y en muchos casos fuentes clasificadas como de alta actividad que al no estar incorporadas en un equipo requieren de un embalaje independiente. El riesgo radiológico durante la operación es mayor que en el caso del uso de equipos.

Los equipos de medida de densidad y humedad de suelos se emplean a poca profundidad. El funcionamiento de estos equipos es de poco riesgo si los utiliza el personal preparado.

Las fuentes radiactivas más utilizadas son el Am-241/Be y el Cs-137. La primera da lugar a una radiación de neutrones que son termalizados por el agua presente en el terreno. La medida de los neutrones termalizados permite conocer la humedad del terreno. La medida de densidad se efectúa en base a la atenuación que experimenta la radiación gamma de la fuente de Cs-137 al atravesar el terreno.

Las fuentes radiactivas están doblemente encapsuladas en aluminio y acero, y cumplen con los requerimientos de la reglamentación de transporte para material radiactivo en "forma especial". Dadas estas características es muy difícil que se produzca pérdida de hermeticidad.



Habitualmente, la fuente de Am-241 permanece dentro del equipo en posición de seguridad, pasando a posición de medida al desplazarse una trampilla, y la fuente de Cs-137 va unida a una varilla sonda desplazándose por un tubo desde el interior del equipo a la posición de medida, exterior del equipo, tras separar una trampilla de salida.

Se requiere que el personal que opere con estos equipos tenga licencia de supervisor u operador. Aunque por las dosis que suelen recibir los trabajadores de este tipo de instalaciones pueden clasificarse como trabajadores tipo B, se exige dosimetría personal TLD, dado que el uso tanto de sondas como de equipos es de forma móvil y dificulta el establecimiento de una dosimetría de área. En el caso del uso de sondas de testificación los trabajadores expuestos se clasificarán como categoría A y se recomienda además el uso de dosimetría operacional de lectura directa debido a la alta actividad de las fuentes radiactivas empleadas.

Para realizar la vigilancia radiológica ambiental durante la operación con estos dispositivos se requiere el uso de detectores adecuados, por tanto, se debe disponer de tantos detectores de radiación como equipos radiactivos. Durante la realización de operaciones, los operadores deberán extremar la vigilancia de los equipos radiactivos, para lo que deberán mantenerse a una distancia de los mismos que les

permita tener un control visual, tanto durante la realización de medidas, como en los intervalos en que no los estén utilizando.

Los equipos de medida de densidad y humedad de suelos deberán ser revisados y sometidos a las operaciones de mantenimiento rutinario mínimo cada seis meses a fin de garantizar el buen funcionamiento de los mismos, desde el punto de vista de la protección radiológica. La revisión semestral de los equipos debe ser realizada por una empresa de asistencia técnica autorizada. Podrá ser efectuada por personal de la instalación radiactiva con licencia de supervisor u operador, cuando el titular disponga de procedimientos aprobados al efecto por el CSN. En este caso los equipos deberán ser revisados por una entidad autorizada con una periodicidad no superior a dos años. No está permitido al personal de la instalación la realización de ninguna operación de revisión o mantenimiento de los equipos que requiera desmontar la fuente radiactiva o varilla sonda del equipo. Estas operaciones sólo podrán ser llevadas a cabo por la empresa de asistencia técnica autorizada.

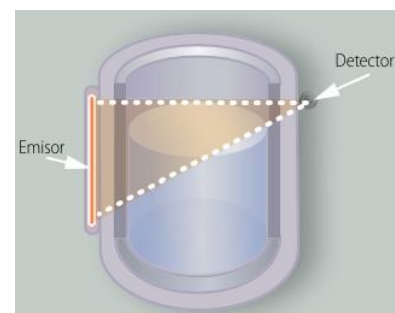
Además, los equipos radiactivos deberán permanecer dentro de su embalaje de transporte, extrayéndose únicamente en el momento en que vayan a ser utilizados. Las áreas en las que se efectúen operaciones con los equipos se señalizarán adecuadamente y se establecerá un control de accesos, procediendo al acordonamiento y balizamiento de la zona de trabajo con dispositivos que produzcan destellos luminosos.

### 1.5 Control de procesos industriales

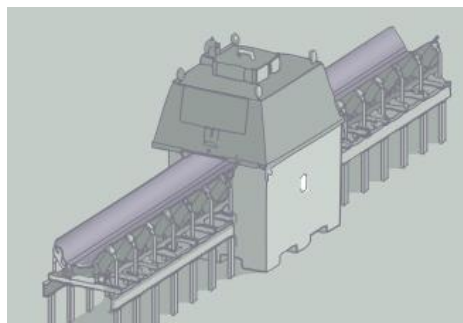
Incluye todos los medidores radiactivos incorporados en línea de un proceso industrial que se usan para el control de determinados parámetros, mediante análisis o medida instrumental. Estos equipos están formados por cabezales que contienen fuentes radiactivas encapsuladas o generadores de radiaciones ionizantes y dispositivos de detección de la radiación, éstos pueden situarse enfrentados con el emisor o junto a él, de forma que se puede medir la radiación transmitida o la dispersada por el material a medir o analizar.

En función del principio de funcionamiento en que se basan, se establecen dos grupos: uno con los equipos medidores (de nivel, densidad, espesor, gramaje, caudal, etc.) y otro con los equipos analizadores de materiales (cemento, minerales, carbón, explosivos, etc.).

- Equipos medidores: El cabezal radiactivo en este tipo de equipos puede tener como emisor una fuente radiactiva encapsulada o un generador de rayos X, incorporados en un soporte blindado para atenuar y colimar la radiación ionizante. Características del emisor:
  - Fuentes radiactivas, algunas de alta actividad, categorías 3 y 4 de la OIEA (Cs-137 y Co-60 como emisores gamma, Sr-90 y Kr-85 como emisores beta y Am-241 como emisor gamma de baja energía).
  - Generadores de rayos X, que pueden ser de media o alta energía.







- Equipos analizadores: Son equipos que están constituidos por una cámara donde se encuentra el emisor y el detector, una cinta transportadora del material que atraviesa la cámara y uno o varios blindajes biológicos contra la radiación. Características del emisor:
  - Fuentes radiactivas encapsuladas de Cf-252 (emisor de neutrones) de alta actividad, categoría 3 de la OIEA.
  - Generadores de neutrones: consiste en un miniacelerador que contiene una fuente de tritio. Los neutrones se producen mediante la aceleración de un haz de deuterio que incide sobre un blanco de tritio y consiguen un flujo pulsado o continuo de neutrones prácticamente monoenergéticos de 14 MeV.

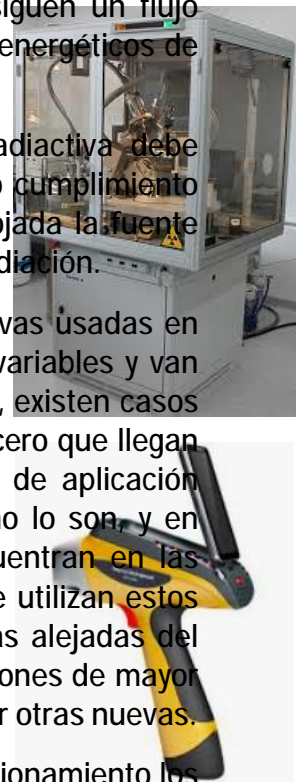
El diseño de los equipos medidores que incorporan la fuente radiactiva debe ajustarse a normas internacionales, como la norma ISO 7205, cuyo cumplimiento implica suficientes garantías de seguridad. El cabezal donde va alojada la fuente dispone de un obturador que permite la emisión y corte del haz de radiación.

Respecto al riesgo radiológico y peligrosidad de las fuentes radiactivas usadas en este campo de aplicación, las actividades que se utilizan son muy variables y van desde los milicurios a unos pocos curios en su mayoría. No obstante, existen casos como fuentes de Cs-137 empleadas para el control de láminas de acero que llegan a tener hasta 1,85 TBq (50 Ci). Esto implica que en este campo de aplicación tenemos fuentes clasificadas como de alta actividad y otras que no lo son, y en cuanto a la clasificación basada a su peligrosidad (OIEA) se encuentran en las categorías 3 y 4. El riesgo radiológico de las instalaciones donde se utilizan estos equipos es en general muy bajo, ya que se suelen instalar en zonas alejadas del personal de la instalación y su operación es automática. Las operaciones de mayor riesgo son las de mantenimiento y sustitución de fuentes agotadas por otras nuevas.

Siempre que sea necesario retirar temporalmente de su lugar de funcionamiento los cabezales radiactivos de los equipos, se almacenarán en un recinto autorizado a tal efecto, donde se medirán mensualmente los niveles de radiación de la zona y se llevará un registro de tales comprobaciones, que se mantendrá en el propio recinto de almacenamiento. Dicho recinto dispondrá de acceso controlado y deberá señalizarse reglamentariamente.

Las operaciones que se efectúen en zona controlada o que afecten a los cabezales radiactivos deberán llevarse a cabo por personal con licencia de operador o supervisor o, al menos, en presencia y bajo la dirección de personal con licencia. El cambio o retirada de las fuentes radiactivas de los cabezales emisores deberá ser realizado por una entidad autorizada.

El personal que dirige el funcionamiento de la instalación dispondrá de licencia de Supervisor y los usuarios de los equipos de licencia de operador, aunque, en



determinados casos, no hay un trabajador asociado al funcionamiento de los equipos, que operan de forma ininterrumpida y de modo automático. Los trabajadores se clasifican como categoría B. El control dosimétrico del personal se suele llevar a cabo mediante dosimetría de área.

### 1.6 Análisis instrumental

Los equipos utilizados en este campo son sistemas de medida que contienen fuentes radiactivas encapsuladas o generadores de radiaciones ionizantes y sistemas de detección de la radiación. Estos equipos, en su mayoría son espectrómetros de fluorescencia o difractómetros de rayos X, que pueden estar instalados de forma fija o móvil.

Se contemplan tres grupos de equipos:

- Difractómetros de Rayos X: son instrumentos utilizados en diversas disciplinas para la identificación no destructiva de las estructuras de los materiales, especialmente cristalinas, por medio de generadores de radiaciones ionizantes.
  - Características del emisor: Tubos de rayos X de baja energía.
- Espectrómetros de fluorescencia: son instrumentos utilizados en el análisis elemental de diversos materiales, que utilizan generadores de radiación ionizante o fuentes radiactivas encapsuladas para la producción de los rayos X de fluorescencia.
  - Características del emisor: Tubos de rayos X de baja y media energía o Fuentes radiactivas encapsuladas de muy baja actividad y categoría 5 de la OIEA (como Am-241, Cm-244, Cd-109 y Fe-55).
- Otros equipos: Equipos utilizados en otras técnicas analíticas (cromatógrafos, neutralizadores, contadores de centelleo, etc.) que no cuentan con aprobación de tipo y que incorporan fuentes radiactivas encapsuladas no exentas. Características del emisor: Fuentes radiactivas de muy baja actividad y categoría 5 de la OIEA (como Ni-63, Kr-85 y Cs-137).

En este tipo de instalaciones podemos encontrar equipos cerrados o en cabina cuyo diseño y construcción garantiza la seguridad y protección radiológica del personal de la instalación, a través, de los blindajes y dispositivos de seguridad intrínsecos. En este caso, los niveles de radiación en el exterior del equipo pueden equipararse a los exigidos para la aprobación de tipo de aparato radiactivo y, por tanto, las medidas de protección radiológica son menos exigentes (dosimetría de área, no existen zonas clasificadas radiológicamente, trabajadores no expuestos, etc.).

En caso de que los equipos a utilizar sean móviles o con haz abierto, o equipos donde las fuentes puedan ser accesibles o en los que las tasas de dosis alrededor del equipo sean significativamente superiores al límite de aprobación de tipo, el personal con licencia se clasificará como trabajadores expuestos de categoría B, el control dosimétrico será personal siempre que sean equipos móviles y se deberá disponer

de detectores de radiación adecuados al tipo de emisión para realizar la vigilancia radiológica.

## 2. TRANSPORTE

El transporte de mercancías peligrosas está regulado en España por los reglamentos específicos que les aplica de manera general, según el modo de transporte (ADR para carretera, RID para ferrocarril, código IMDG para transporte marítimo e Instrucciones Técnicas del OACI para transporte aéreo), recogiendo todos ellos, para el caso de material radiactivo, las disposiciones establecidas en el Reglamento para el transporte seguro de material radiactivo del OIEA, de referencia SSR-6. Estos reglamentos exigen que existan medidas para la protección radiológica de los trabajadores y del público, que debe someterse a los mismos requisitos de protección radiológica que el resto de prácticas que conllevan riesgo radiológico y, por tanto, cumplir lo establecido en el Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, así como, los principios fundamentales de protección radiológica (justificación, optimización y limitación de dosis).

Los objetivos de la normativa que aplica al transporte de material radiactivo para aplicaciones industriales están dirigidos hacia la contención del material por el embalaje (evitando su dispersión y posible incorporación por las personas), el control de la radiación emitida por los bultos y la reducción de las dosis (tanto para profesionales expuestos como para el público). Por tanto, es imprescindible un adecuado diseño del bulto de transporte y la elaboración y cumplimiento de procedimientos operacionales que garanticen la protección radiológica de las personas.

### 2.1 Protección radiológica en el transporte

La normativa de transporte establece una gradación respecto al riesgo para los materiales radiactivos, mediante el establecimiento de una serie de valores básicos para una amplia lista de radionucleidos, entre los que se encuentran los valores de exención por actividad total de la remesa o por actividad específica, dando crédito en este último caso al autoblandaje que puede proporcionar el propio material. Para aquellos radionucleidos no definidos, la norma establece unos valores de exención muy conservadores, o dicta que sea la autoridad competente quien apruebe tales valores.

Los valores de exención se calcularon sobre estos dos fundamentos:

- Que en condiciones normales no se superaría una dosis efectiva individual de 10  $\mu$ Sv en un año.
- Que en condiciones normales no se superaría una dosis colectiva de 1 persona x Sv en un año.

Todos aquellos materiales que superen los dos valores de exención, deben ser ~~tratados como mercancías~~ peligrosas, y le son de aplicación los requisitos establecidos en los reglamentos modales.

A continuación, se detallan los aspectos de protección radiológica relacionados con esta actividad.

#### 2.1.1 Protección radiológica basada en el diseño del bulto de transporte

Según el reglamento de transporte seguro de material radiactivo del OIEA, SSR-6, se considera un bulto al embalaje con su contenido radiactivo, tal como se presenta para el transporte.

Se definen una serie de tipos de bultos cuyos requisitos de embalaje se establecen de forma graduada, en función del riesgo del contenido. De manera que según aumenta ese riesgo, el diseño ha de tener unas características determinadas para poder soportar condiciones de transporte cada vez más exigentes:

- Rutinarias, es decir, atribuibles al transporte en sí mismo, sin considerar incidencias. Los bultos que han de soportar sólo estas condiciones contienen actividades muy bajas de material radiactivo, de modo que si éste se dispersara en un accidente las consecuencias radiológicas serían insignificantes.
- Normales, incluyendo pequeñas incidencias (pequeñas caídas y golpes de bultos, apilamientos, etc.), que pueden darse durante un transporte. En este caso, los bultos contienen más actividad, pero en una cantidad tal que, si se dispersara por la rotura del mismo, sería improbable que las consecuencias radiológicas provocasen efectos biológicos detectables.
- Accidentales, situaciones con incidencias graves de tipo mecánico y térmico. Los bultos que han de soportar las condiciones de accidente sí tienen un contenido de alto riesgo que podría dar lugar a graves consecuencias en caso de rotura o destrucción del embalaje.

En función de esto, se definen los siguientes tipos de bulto<sup>1</sup>:

- Exceptuados.
- Industriales (tipo BI-1, tipo BI-2, tipo BI-3).
- Tipo A.
- Tipo B.
- Tipo C.

Los bultos exceptuados y tipo BI-1 deben poder soportar condiciones de transporte rutinarias, los de tipo BI-2, tipo BI-3 y tipo A deben poder soportar condiciones de transporte rutinarias y normales y, por último, los bultos de tipo B y tipo C deben poder soportar condiciones de transporte rutinarias, normales y de accidente.

Cada tipo de bulto está limitado por el contenido. Esta limitación está determinada por unos valores básicos de referencia denominados A<sub>1</sub> (material no dispersable) y A<sub>2</sub> (material dispersable) que se corresponden con las cantidades de actividad máximas que dan lugar a una dosis de 50 mSv a una persona que esté media hora

<sup>1</sup> No se incluye en este listado los bultos fisiónables, ya que no se emplean en el transporte de material para aplicaciones industriales.

a un metro de distancia de la fuente tras el accidente calculados por el OIEA mediante el denominado "sistema Q" (que proviene del inglés Quantity).

Este sistema considera cinco vías que pueden dar exposición a la radiación, bien externa o interna considerando la actividad del contenido sin blindaje.

Para cada vía de exposición se obtiene un valor límite de cantidad de actividad para el contenido considerado:

- Por irradiación externa, sin considerar dispersión:  $Q_A$  (dosis externa debida a fotones) y  $Q_B$  (dosis externa debida a partículas beta).
- Por contaminación externa e interna:  $Q_C$  (dosis por inhalación),  $Q_D$  (dosis en la piel y por ingestión debida a la transferencia de la contaminación) y  $Q_E$  (dosis por inmersión en una nube radiactiva).

Los cinco límites de actividad del contenido citados se han calculado para cada radionucleido y el valor de  $A_1$  es el menor de los valores de  $Q_A$  y  $Q_B$ , mientras que el valor de  $A_2$  es el menor de entre  $A_1$  y el resto de los valores  $Q$ .

El valor de actividad  $A_1$  aplica cuando el material radiactivo que se transporta está encapsulado en forma especial, de manera que es difícilmente dispersable o disgregable (esto supone que el material radiactivo posee una alta integridad física y si saliera fuera del embalaje en un accidente, aunque daría lugar a un riesgo de irradiación externa, es muy improbable que existiera riesgo de contaminación), mientras que el valor  $A_2$  aplica si el material no está encapsulado en forma especial.

Los materiales encapsulados en forma especial deben disponer de un certificado emitido por el país de origen que asegure que el diseño supera una serie de ensayos destructivos definidos en la reglamentación.

Los valores de  $A_1$  y  $A_2$  se listan en la reglamentación de transporte para cada radionucleido y, al igual que en el caso de los valores de exención, si se pretende transportar alguno no incluido en la lista, la determinación de sus valores  $A_1$  y  $A_2$  requiere de aprobación de la autoridad competente. En su defecto, la reglamentación establece unos valores  $A_1$  y  $A_2$  muy conservadores en función del tipo de radiación presente.

$A_1$  y  $A_2$  representan exactamente las actividades máximas de un material radiactivo en forma especial o en otra forma, respectivamente, que pueden ser transportadas en un bulto Tipo A; pero, además, son valores de referencia usados en la reglamentación para establecer muchos otros límites, como por ejemplo, los de contenido para el material de Baja Actividad Específica (BAE) y los bultos Exceptuados, los de fuga de actividad en un bulto Tipo B y los del contenido en un bulto tipo B que se transporte por vía aérea y a partir del cual ha de usarse un bulto tipo C.

La protección radiológica intrínseca al diseño del bulto, además de en la limitación del contenido, se basa en la limitación de los niveles de radiación en su exterior a través de los sistemas de blindaje. La reglamentación define los siguientes límites:

- Bultos exceptuados:  $5 \mu\text{Sv/h}$  en cualquier punto de su superficie.
- Otros tipos de bulto:

- Si no se transporta bajo la modalidad de uso exclusivo<sup>2</sup>:
  - § 2 mSv/h en cualquier punto de su superficie.
  - § 0,1 mSv/h a un metro de la superficie.
- Si se transportan bajo la modalidad de uso exclusivo:
  - § 10 mSv/h en cualquier punto de su superficie.
  - § Sin limitación de tasa de dosis a un metro de la superficie.



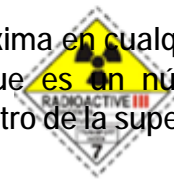
## 2.1.2 Protección radiológica basada en procedimientos administrativos y operacionales

### 2.1.2.1 Señalizaciones



La señalización del bulto incluye el etiquetado que deriva de la *Categoría del bulto* (clasifica al bulto en función del riesgo de irradiación externa) y el marcado.

Hay 3 categorías determinadas por la intensidad de radiación máxima en cualquiera de las superficies del bulto y el Índice de transporte (IT), que es un número adimensional que representa el nivel de radiación máximo a un metro de la superficie del bulto.



- Categoría I-Blanca:
  - La intensidad de dosis en la superficie no puede sobrepasar los 0,005 mSv/h; y
  - El IT debe ser 0 (se considerará cero siempre que el IT calculado no sea superior a 0,05)
- Categoría II-Amarilla:
  - La intensidad de dosis en la superficie debe ser superior a 0,005 mSv/h e inferior o igual a 0,5 mSv/h; y
  - El IT debe ser superior a 0 pero inferior o igual a 1.
- Categoría III-Amarilla:
  - La intensidad de dosis en la superficie es superior a 0,5 mSv/h pero inferior o igual a 2 mSv/h; y
  - El IT debe ser superior a 1, pero inferior o igual a 10.

El bulto se transportará en modalidad de uso exclusivo si se superan los valores que determinan la Categoría III, asignándole al bulto dicha categoría. En caso de que sólo se dé una de las 2 condiciones que categorizan el bulto, siempre se elegirá la más restrictiva.

Todos los bultos llevarán dos etiquetas de la categoría que les corresponda, situadas en los lados o posiciones opuestas de su superficie, salvo los bultos exceptuados que deben mostrar en su interior la indicación de "radiactivo". Cada categoría se etiqueta de la siguiente manera:

<sup>2</sup> Por uso exclusivo se entenderá el empleo exclusivo, por un solo remitente, de un medio de transporte o de un gran contenedor, respecto del cual todas las operaciones iniciales, intermedias y finales de carga y descarga y expedición sean efectuadas de conformidad con las instrucciones del remitente o del destinatario, cuando el presente Reglamento así lo exija.

Marcado y etiquetado de un bulto no exceptuado.

9

5.2.1.7.1  
ADR-2023

Al menos una (1) etiqueta

5.2.1.7.2  
ADR-2023

Al menos una (1) etiqueta.

5.2.1.10.1  
ADR-2021

**FLECHAS DE ORIENTACION**  
Solo para bultos exceptuados o IP-1, que transporten líquidos. Al menos una (1) etiqueta. En caso de que sea necesario el transporte en una determinada posición, deberán utilizarse independientemente del tipo de bulto según 5.2.2.1.12.2 del ADR

5.2.1.7.3  
ADR-2023

Opcional cuando sean transportados en régimen de uso exclusivo.

5.2.1.7.3  
ADR-2023

Al menos una (1) si la masa bruta es superior a 50 kg.

5.2.2.1.11.1  
ADR-2023

Las etiquetas deberán estar situadas en dos (2) caras opuestas. Los bultos exceptuados no llevan etiquetas radiológicas

5.2.2.1.1 y 3.2 Tabla A col (5)  
ADR-2023

Remitente  
Destinatario o  
ambos:

MATERIAL RADIOACTIVO, BULTO DEL TIPO B (u), NU 2916  
RADIOACTIVE MATERIAL, TYPE B (u) PACKAGE, UN 2916

Radioactive LSA-I (BAE-I)  
Radioactive SCO-I (OCS-I)

Gross Weight 60 kgs  
Peso Bruto 60 kgs

Identificación

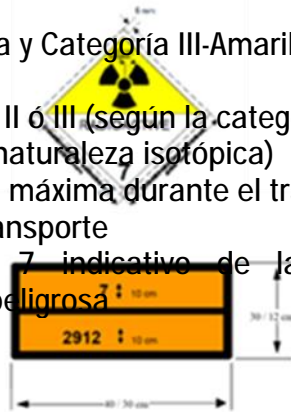
Al menos una (1) etiqueta.

Tipo		Marca	identificación	Número de Serie	TREBOL
Industriales	BI-1	"TIPO BI-1"	-----	-----	-----
	BI-2	"TIPO BI-2"	Código VRI	-----	-----
	BI-3	"TIPO BI-3"	Código VRI	-----	-----
Tipo A		"TIPO A"	Código VRI	-----	-----
Tipo B	B(U)	"TIPO B(U)"	Marca del diseño aprobado	SI	5.2.1.7.6 (ADR-2021) 
	B(M)	"TIPO B(M)"	Marca del diseño aprobado	SI	
Tipo C		"TIPO C"	Marca del diseño aprobado	SI	

Al menos una etiqueta.



- Categoría I-Blanca:
  - RADIOACTIVE I
  - Contenido (naturaleza isotópica)
  - Actividad (la máxima durante el transporte)
  - El número 7 indicativo de la clase de mercancía peligrosa
- Categoría II-Amarilla y Categoría III-Amarilla:
  - RADIOACTIVE II ó III (según la categoría)
  - Contenido (naturaleza isotópica)
  - Actividad (la máxima durante el transporte)
  - Índice de transporte
  - El número 7 indicativo de la clase de mercancía peligrosa



En los 3 casos las barras indicativas del tipo de categoría que acompañan a la palabra "Radioactive" serán de color rojo e informan del incremento del nivel de radiación en el exterior del bulto según aumenta su número.

La etiqueta blanca indica que el riesgo de irradiación externa es muy bajo, por lo que no son necesarias medidas especiales para manipular los bultos o establecer distancias de segregación respecto a las personas. La etiqueta amarilla advierte al trabajador de la necesidad de reducir el tiempo de manipulación al mínimo imprescindible para realizar las operaciones e implica limitaciones en la estiba de los bultos en los vehículos y en su almacenamiento, requiriendo, además, considerar distancias de segregación para trabajadores y público.



El marcado de los bultos informa sobre las características del diseño, riesgo, origen y destino del mismo. Incluye:

- Identificación del expedidor y/o del destinatario.
- Tipo de bulto,
- Código VRI del país de origen del diseño (código internacional de matrículas de vehículos, que en España se corresponde con "E").
- Nombre del fabricante u otra identificación del embalaje especificada por la autoridad competente.
- Marca de identificación asignada al diseño por la autoridad competente, si aquel está sujeto a aprobación previa, así como el número de serie del bulto.
- Peso bruto admisible del bulto, si es superior a 50 kg.
- Número de Naciones Unidas<sup>3</sup>, precedido de las letras "UN" y la descripción de la materia correspondiente.

En el caso de los bultos exceptuados sólo es necesario que en su exterior se indique el número de Naciones Unidas y la identificación del expedidor y/o del destinatario.

---

<sup>3</sup> Es un número de cuatro cifras asignado por el Comité de expertos de la Naciones Unidas en el transporte de mercancías peligrosas, que identifica una mercancía peligrosa concreta. En el caso de las radiactivas hay un total de 26, cada uno de los cuales representa un tipo de materia y/o bulto radiactivo (la denominada "descripción de la materia").

Los vehículos también deben señalizarse. Para el transporte por carretera, se requiere que el vehículo porte en los laterales y parte trasera una etiqueta romboidal cuya mitad superior, de fondo amarillo, recoge el trébol indicativo de la radiactividad, y la inferior la palabra "RADIOACTIVE" y el número 7, que indica la clase de materia peligrosa. Además, dispondrá de un panel naranja en la parte posterior y anterior que indica el transporte de mercancías peligrosas.

#### 2.1.2.2 Límites de contaminación superficial<sup>4</sup>

Se consideran los siguientes límites operacionales:

- Límite de contaminación superficial transitoria (desprendible) en la superficie externa de cualquiera de los tipos de bulto y en las superficies de los medios de transporte:
  - Emisores beta/gamma o alfa de baja toxicidad: 4 Bq/cm<sup>2</sup>.
  - Resto de emisores alfa: 0,4 Bq/cm<sup>2</sup>.
- Límite de contaminación superficial no transitoria (fija) en la superficie de los medios de transporte:
  - El nivel de radiación máximo debido a la misma será de 5 µSv/h.
- Límites de contaminación transitoria en el interior de los embalajes vacíos que se transporte como bultos exceptuados:
  - Emisores beta/gamma o alfa de baja toxicidad: 400 Bq/cm<sup>2</sup>.
  - Resto de emisores alfa: 40 Bq/cm<sup>2</sup>.

#### 2.1.2.3 Limitación del nivel de radiación en el exterior del medio de transporte

Se establecen los siguientes límites:

- 2 mSv/h en cualquier punto de la superficie exterior, y
- 0,1 mSv/h a 2 metros de la superficie

La reglamentación no define ningún valor límite para el área de conducción de los medios de transporte (cabina), considerando que el control de las dosis de los

<sup>4</sup> La reglamentación aplicable al transporte de material radiactivo define contaminación como la presencia de una sustancia radiactiva sobre una superficie en cantidades superiores a 0,4 Bq/cm<sup>2</sup> en el caso de emisores beta y gamma o emisores alfa de baja toxicidad ó 0,04 Bq/cm<sup>2</sup> en el caso del resto de emisores alfa.

trabajadores que lleven a cabo la conducción se realizará de acuerdo a los principios de optimización y limitación de dosis.

#### 2.1.2.4 Limitación en la estiba de los bultos en los medios de transporte

Se establece para el índice de transporte total (IT) del medio de transporte. Se puede obtener, bien sumando los IT individuales de los bultos que porta (método más restrictivo), bien midiendo directamente la intensidad de radiación a 1 m de su superficie, dependiendo de las características del vehículo.

El primer método debe aplicarse siempre en caso de sobreembalajes no rígidos o cuando la expedición proceda de varios expedidores. Este método no contempla la posible atenuación de los bultos posicionados en la periferia respecto a los ubicados en el interior y, por tanto, es más conservador. El segundo método debe contemplar una serie de factores multiplicativos de corrección para cargas de grandes dimensiones, ya que, en este caso, la medida a un metro no detectará adecuadamente la radiación proveniente de los extremos de la carga.

Para el transporte en modalidad de uso exclusivo no se establece limitación alguna al existir un control radiológico directo de las operaciones por parte de un solo expedidor.

#### 2.1.2.5 Distancias de segregación

Se establecen distancias de segregación entre los bultos y las personas para minimizar las dosis posibles. A partir de los siguientes valores de dosis de referencia se determinan tales distancias:

- Para los trabajadores en zonas de trabajo normalmente ocupadas, una dosis de 5 mSv en un año.
- Para los individuos del público, en zonas a las que tengan normalmente acceso, una dosis de 1 mSv en un año para el grupo crítico.

A partir de estos valores de referencia, los diferentes reglamentos de transporte de mercancías peligrosas, en función de las características particulares de sus operaciones, presentan unas tablas que, en función de la suma de los IT de los bultos, el tipo de zona donde se almacenen y el tiempo esperado de almacenamiento, determinan las distancias de segregación. Estas tablas también consideran situaciones restrictivas que aseguran la reducción significativa de la dosis.

### 2.2 Programa de Protección Radiológica

Las empresas que realicen este tipo de actividades deben desarrollar un Programa de Protección Radiológica (PPR) para el transporte de material radiactivo, cuyo objetivo será el cumplimiento de los principios de optimización y limitación de dosis y el desarrollo de procedimientos de actuación ante situaciones de emergencia.

Se trata de un documento requerido por los reglamentos modales que garantiza el cumplimiento del RD 1029/2022, estableciendo las medidas y controles adecuados para ello, y que engloba aspectos relativos tanto a situaciones rutinarias como de emergencia, incluidas las operaciones de preparación, carga, descarga,

manipulación, transporte y almacenamiento en tránsito de los bultos, mejorando la cultura de seguridad de la empresa.

La Guía de Seguridad 6.2 del CSN se refiere al contenido de estos programas, y establece que debe incluir:

#### 2.2.1 Alcance

Se establece el campo de aplicación del PPR, definiendo el tipo de transporte a realizar (tipos y categorías de bultos y naturaleza de los materiales radiactivos), las condiciones de transporte (uso exclusivo o no), el tipo de operaciones y los riesgos a que se verán expuestos los trabajadores y su clasificación según el RD 1029/2022. Igualmente, puede incluir valoraciones cuantitativas aproximadas, como la cantidad anual de bultos, según su categoría, la duración de las diferentes operaciones o las distancias medias de segregación durante las operaciones, ofreciendo una idea preliminar del riesgo radiológico de las actividades que cubre el PPR que justifiquen las normas y medidas de protección radiológica a establecer.

#### 2.2.2 Organización y responsabilidades

Debe quedar definida la línea de autoridad y responsabilidad, de tal modo, se debe detallar la organización de la empresa en relación con las actividades de transporte y la protección radiológica, precisando las funciones, responsabilidades y prohibiciones específicas por puesto de trabajo. En este sentido, las responsabilidades que aplican son:

- Dirección de la empresa: implantar una cultura de seguridad a todos los niveles de la empresa en relación al transporte de material radiactivo, teniendo que definir y documentar los objetivos de protección, dotar de la infraestructura y medios necesarios para cumplir las disposiciones reglamentarias y los objetivos establecidos en el PPR, establecer la organización más adecuada para conseguir el objetivo ALARA, implantar programas de formación continuada de los trabajadores, exigir el cumplimiento de los objetivos de protección radiológica y cooperar con otras organizaciones implicadas en las operaciones de transporte.
- Responsable de Protección Radiológica<sup>5</sup>: establecer y aplicar el PPR, preparar los procedimientos operacionales necesarios, controlar la vigilancia de la radiación y de la contaminación, elaborar los documentos y archivos relacionados con sus funciones, desarrollar y supervisar los programas de formación y entrenamiento del personal y velar por el cumplimiento del RD 1029/2022.
- Trabajadores: cooperar con la Dirección en materia de protección radiológica, contribuir a su seguridad y protección, así como, la del resto de trabajadores y público, seguir los procedimientos establecidos en el PPR y cumplir las disposiciones reglamentarias.

<sup>5</sup> Jefe de Servicio de Protección Radiológica o Supervisor, o persona con formación mínima demostrable correspondiente al área básica definida en los programas de formación recogidos en la Guía de Seguridad 5.12 del CSN. También se puede contratar este servicio a una Unidad Técnica de Protección Radiológica autorizada por el CSN.



- Consejero de seguridad para el transporte<sup>6</sup>: cumplir con la reglamentación específica en materia de transporte de mercancías peligrosas y que dicho transporte se realice de forma segura.

### 2.2.3 Evaluación de dosis, vigilancia radiológica y optimización

La estimación previa de la posible dosis que recibirán trabajadores y público permite establecer las medidas de protección radiológica necesarias para cumplir con los objetivos ALARA definidos en el PPR, así como, para clasificar a los profesionales expuestos y definir la vigilancia radiológica a realizar.

La Guía 6.2 del CSN recomienda diferentes métodos para realizar esta evaluación previa: análisis de datos históricos de dosis recibidas por trabajadores en idénticas o similares operaciones, cálculos basados en las tasas de dosis en el exterior de los bultos que habitualmente se manipulan, cálculo teórico utilizando, por ejemplo, códigos de cálculo y el análisis basado en datos bibliográficos que ofrecen resultados de dosis recibidas por los trabajadores en el transporte o la manipulación de bultos radiactivos.

Tras la evaluación previa es necesario realizar una vigilancia radiológica de las personas y del ambiente de trabajo durante las operaciones de transporte con objeto de verificar el cumplimiento de las normas y criterios de protección radiológica, y se confirmen las estimaciones de dosis realizadas.

En el PPR se establecerán procedimientos que contemplen: la vigilancia radiológica del ambiente de trabajo (bultos, medios de transporte y lugares de almacenamiento y manipulación), la vigilancia de la contaminación superficial (en caso de existir tal riesgo, se vigilarán las áreas de trabajo, embalajes, equipos, medios de transporte y personas) y la vigilancia radiológica del personal (clasificación radiológica, dosimetría, etc.).

El PPR recogerá los límites de dosis definidos en el RD 1029/2022 y las restricciones de dosis que se consideren oportunas, que representarán una fracción de los límites de dosis y reflejarán las dosis que podría alcanzarse aplicando buenas prácticas. Además, debe prever un sistema de análisis y evaluación periódica que permita la revisión y mejora de las medidas de protección radiológica a partir de las dosis recibidas en operación normal o en incidencias.

Para cumplir con el criterio ALARA, el PPR debe definir acciones tales como:

- Análisis periódico de la dosis individual y colectiva para compararlas con los valores previstos.
- Análisis de las dosis individuales asociadas a las diferentes tareas y la definición de límites de dosis operacionales.
- Definición de niveles de dosis de referencia cuya superación suponga una investigación de los procedimientos de operación y la adopción de medidas de protección adicionales.
- Aplicación de distancias de segregación de los bultos respecto a las personas.

<sup>6</sup> Se trata de una figura requerida tanto en el RD 97/2014 (carretera) como en el RD 1566/1999 (ferrocarril).



- Desarrollo de medidas específicas para la estiba, carga, descarga y sujeción de bultos con un elevado IT.
- Identificación de casos en los que se precisa el uso de blindajes.
- Implantación de restricciones para el acceso a áreas con niveles de radiación altos. El establecimiento de rotaciones del personal en función de la dosis ocupacional, optimizando el número de personas que participen en una misma tarea.
- Requerimiento o recomendación del uso de sistemas auxiliares para el manejo de los bultos.
- Desarrollo de un programa de formación dirigido a la reducción de las dosis operacionales.

#### 2.2.4 Segregación y otras medidas de protección

El PPR definirá un procedimiento para determinar las distancias de segregación en función de los valores de dosis de referencia establecidos en la reglamentación aplicable al transporte con objeto de limitar la exposición de trabajadores y público.

Se podrán adoptar otras medidas adicionales de protección, como la reducción del tiempo de permanencia cerca de los bultos, uso de blindajes, clasificación y señalización de zonas en los almacenes, uso de detectores de radiación, etc.

#### 2.2.5 Respuesta en emergencias

Aquellos con responsabilidad en la operación de transporte de material radiactivo (expedidor, transportista, y si es el caso, receptor) dispondrán de un plan de actuación ante una emergencia con objeto de prevenir o minimizar el riesgo derivado de un posible incidente o accidente en el transporte. Este plan define las responsabilidades de la empresa a la que aplique, según sea del expedidor, del transportista o del receptor, así como, su posible interacción o con otros organismos, servicios de intervención y autoridades que se vean implicados en la emergencia.

El expedidor es el responsable de desarrollar las instrucciones de emergencia aplicables a una expedición concreta y las entregará al transportista. Además, en el plan del expedidor se considerarán las medidas de actuación específicas en función del material radiactivo que transporte, así como, la comunicación con las autoridades competentes. El plan del transportista incluirá medidas generales de actuación y protección radiológica para tales situaciones, incluyendo la actuación y comunicación con el expedidor o receptor y autoridades competentes. En todos los casos el plan definirá la información mínima que debe recogerse y ser trasladada a los diferentes organismos, autoridades o fuerzas de intervención que participen en la emergencia.

#### 2.2.6 Formación del personal

La formación en el transporte de material radiactivo debe cubrir tres niveles: formación general, formación sobre funciones específicas y entrenamiento de seguridad que incluya la respuesta ante situaciones de emergencia. Esta formación tratará:



- Conocimientos sobre la naturaleza y riesgos de las radiaciones ionizantes.
- Efectos de las radiaciones ionizantes.
- Medida de la radiación.
- Medidas de protección a aplicar en condiciones normales de trabajo, de accidente y en el uso de equipos específicos.
- Conocimientos de la reglamentación aplicable.

Una correcta información y formación, así como, un adecuado entrenamiento, sobre los riesgos radiológicos, las medidas de protección radiológica y los requisitos específicos del transporte, son pilares básicos para mejorar la seguridad en esta actividad y cumplir con los objetivos ALARA de reducción de dosis.

La IS-38 del CSN concreta, para el transporte de material radiactivo por carretera, unos contenidos mínimos de formación, tanto inicial como de reciclaje, la periodicidad mínima para la impartición de la formación de reciclaje y las características de los registros de la formación.

### 2.2.7 Seguridad física

Por la propia naturaleza de este tipo de materiales, su posesión y uso deben ser controlados de acuerdo con estrictos requisitos no solo de seguridad tecnológica y protección radiológica, sino también de seguridad física, con la finalidad de impedir que estos materiales puedan ser objeto de actos maliciosos tales como el sabotaje, el robo o su retirada no autorizada para usos indebidos.

La Instrucción del CSN IS-46 , de 14 de mayo de 2024, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre seguridad física durante el transporte de materiales nucleares y fuentes radiactivas, contiene los requisitos de seguridad física que el Consejo de Seguridad Nuclear considera necesarios para la implantación correcta y eficaz de las medidas generales y de las medidas específicas de protección física establecidas en el real decreto para el transporte de materiales nucleares de categoría II y III, y de fuentes radiactivas de categoría 1, 2 y 3.

## 3. BIBLIOGRAFÍA

- Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.
- Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas.
- Real Decreto 97/2014, de 14 de febrero, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.
- Real Decreto 1566/1999 sobre los Consejeros de Seguridad para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable.

- Real Decreto 2115/1998, de 2 de octubre, sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera.
- Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas
- Instrucción IS-28, de 22 de septiembre de 2010, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre las especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría.
- Instrucción IS-34, de 18 de enero de 2012, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios en relación con las medidas de protección radiológica, comunicación de no conformidades, disponibilidad de personas y medios en emergencias y vigilancia de la carga en el transporte de material radiactivo.
- Instrucción IS-35, de 4 de enero de 2014, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre el tratamiento de las modificaciones de diseño de bultos de transporte de material radiactivo con certificado de aprobación de origen español y de las modificaciones físicas o de operación que realice el remitente de un bulto sobre los embalajes que utilice.
- Instrucción IS-38, de 10 de junio de 2015, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre la formación de las personas que intervienen en los transportes de material radiactivo por carretera.
- Instrucción IS-39, de 10 de junio de 2015, del Consejo de Seguridad Nuclear, en relación con el control y seguimiento de la fabricación de embalajes para el transporte de material radiactivo.
- Instrucción IS-42 de 26 de julio de 2016, del Consejo de Seguridad Nuclear, por la que se establecen los criterios de notificación al Consejo de sucesos en el transporte de material radiactivo.
- CSN IS-46, de 14 de mayo de 2024, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre seguridad física durante el transporte de materiales nucleares y fuentes radiactivas,
- Instrucción IS-41, de 26 de julio de 2016, del Consejo de Seguridad Nuclear, por el que se aprueban los requisitos sobre protección física de fuentes radiactivas.
- Guía de seguridad 5.14 (Rev. 1) del CSN. Seguridad y protección radiológica de las instalaciones radiactivas de gammagrafía industrial.
- Guía de seguridad 6.2 del CSN. Programa de protección radiológica aplicable al transporte de materiales radiactivos.
- Guía de seguridad 6.4 del CSN. Documentación para solicitar autorizaciones en el transporte de material radiactivo: aprobaciones de bultos y autorización de expediciones de transporte.
- Guía de seguridad 6.5 del CSN. Guía de ayuda para la aplicación de los requisitos reglamentarios sobre transporte de material radiactivo.
- Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos. Edición de 2018. Nº SSR-6 (Rev. 1). Colección Normas de Seguridad. OIEA.
- Acuerdo europeo relativo al transporte de internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR). Edición 2023.
- Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities. Nº SSG-8. Colección Normas de Seguridad. OIEA.

- Clasificación de las fuentes radiactivas. Guía de seguridad N° RS-G-1.9. Colección de Normas de Seguridad. OIEA.
- Guía sobre criterios de protección radiológica operacional para trabajadores expuestos en instalaciones radiactivas del sector industrial. SEPR. 2016.