GUÍA DIDÁCTICA PARA CENTROS DE ENSEÑANZA SECUNDARIA

RADIACIÓN Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA



CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

SEPR SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

isftic Instituto Superior de Formación y Recursos en Red para el Profesorado

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CULTURA

Referencia: OFC-04.06
Actualización 2025

© Consejo de Seguridad Nuclear, 2025

Edita y distribuye:
Servicio de Publicaciones
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
tel.: 91 346 01 00
www.csn.es

Diseño y maquetación: Ángel Merlo

Depósito Legal: M-27348-2025

ÍNDICE

PRÓLOGO 4

ENFOQUE GENERAL 6

OBJETIVOS 8

ESTRUCTURA 10

CONTENIDO 12

NIVEL I 14

- UNIDAD 1. LA RADIACIÓN ESTÁ EN TODAS PARTES 17
- UNIDAD 2. ¿QUÉ ES LA RADIACIÓN IONIZANTE? 28
- UNIDAD 3. ¿CÓMO DETECTAR LA RADIACIÓN IONIZANTE? 38
- UNIDAD 4. ¿CÓMO AFECTA A NUESTRO CUERPO LA RADIACIÓN? 46
- UNIDAD 5. APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES 56
- UNIDAD 6. APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN INDUSTRIA E INVESTIGACIÓN 69
- UNIDAD 7. OBTENCIÓN DE ENERGÍA DE ORIGEN NUCLEAR 81

NIVEL II 94

- UNIDAD 1. RADIACIÓN IONIZANTE EN LA VIDA DIARIA 97
- UNIDAD 2. LA RADIACIÓN IONIZANTE Y SUS EFECTOS BIOLÓGICOS 110
- UNIDAD 3. PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN IONIZANTE 119
- UNIDAD 4. APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES 131
- UNIDAD 5. OTRAS APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES 147
- UNIDAD 6. OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR 158
- UNIDAD 7. LOS RESIDUOS RADIACTIVOS 176

SUPLEMENTO TÉCNICO 184

- 1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS 185
- 2. LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO 193
- 3. ESPECTRO DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICO: RADIACIÓN IONIZANTE Y NO IONIZANTE 199
- 4. RADIACTIVIDAD Y RADIACIONES IONIZANTES 207
- 5. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN Y ASPECTOS LEGALES 216
- 6. CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR Y FUNCIONAMIENTO DE LAS CENTRALES NUCLEARES 223
- 7. OTRAS APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES 234
- 8. RESIDUOS RADIACTIVOS: ORIGEN Y GESTIÓN 265
- 9. EL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR 279

GLOSARIO 290

BIBLIOGRAFÍA 302

PRÓLOGO



Desde el Consejo de Seguridad Nuclear presentamos esta nueva edición del **Curso para escuelas de enseñanza primaria y secundaria: Radiación y protección radiológica**. Esta actualización ha sido impulsada por la Dirección Técnica de Protección Radiológica del CSN y por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR), con el fin de adaptar los contenidos a la normativa vigente y a los avances más recientes en el campo de las radiaciones ionizantes y su protección.

El objetivo de esta guía es facilitar al profesorado de educación secundaria materiales didácticos que les permitan introducir al alumnado en el conocimiento de las radiaciones ionizantes y de sus aplicaciones en nuestra vida cotidiana.

En una sociedad sustentada en el conocimiento, comprender el entorno científico y tecnológico resulta imprescindible. Las radiaciones ionizantes forman parte de nuestra existencia desde el mismo momento en que nacemos, y sus usos continúan creciendo tanto en el ámbito médico como en el industrial. Por ello, promover una educación basada en información rigurosa es clave para desarrollar una ciudadanía preparada y responsable.

Sabemos que, en muchas ocasiones, el desconocimiento genera inquietud o temores infundados. Por eso, en el Consejo de Seguridad Nuclear apostamos por la transparencia, la formación y la comunicación como herramientas esenciales para acercar la ciencia a la sociedad.

La historia de la ciencia ha sido siempre un camino desde las creencias hacia el conocimiento fundamentado. Esa misma senda debemos recorrer cuando abordamos el mundo de las radiaciones ionizantes: observar, comprender, explicar… Solo así se puede actuar desde la reflexión y el pensamiento crítico.

Con esta revisión de contenidos, queremos contribuir al aprendizaje y apoyar a las maestras y maestros que transmiten estos conocimientos en las aulas. Deseamos que este material ayude a despertar curiosidad, a fomentar el espíritu crítico y a fortalecer una cultura de protección radiológica desde edades tempranas.

Mi agradecimiento más sincero a todos los equipos y personas expertas que han participado en la actualización de este proyecto. Su dedicación y profesionalidad han hecho posible esta herramienta educativa renovada.

Confío en que esta guía resulte útil y cumpla con su objetivo fundamental, que es aportar conocimiento y contribuir a una comprensión más profunda y segura del papel de las radiaciones en nuestra sociedad

Juan Carlos Lentijo
Presidente del CSN

ENFOQUE GENERAL



La radiación ionizante y la radiación no ionizante son temas bastante complejos y abstractos, especialmente para explicárselo al alumnado de menor edad. Por otra parte, estas materias no están incluidas dentro de la enseñanza obligatoria para los cursos de secundaria en nuestro país, por lo que se tratará de materias transversales para impartir si el profesorado lo estima oportuno.

Esta guía didáctica presenta un "programa en espiral", que significa que los diferentes temas reaparecen en los dos niveles aumentando en complejidad. Este mismo enfoque tiene la Guía Didáctica para Centros de Enseñanza Primaria, ambos volúmenes se han concebido como obras independientes aunque complementarias.

El material aquí contenido ha sido concebido para su utilización en la enseñanza secundaria y se divide en dos niveles, según la edad: 12 a 16 años (Enseñanza Secundaria Obligatoria) y de 16 a 18 años (Educación secundaria postobligatoria: Formación Profesional y Bachillerato). Cada nivel puede ser impartido como una unidad completa, aunque los profesores son libres de emplear material de unidades anteriores o posteriores. Por consiguiente, el manual podría considerarse como una fuente de material de referencia para que el profesorado construya sus propias unidades y se complete con un amplio suplemento técnico.

En estos dos niveles se enfatiza la conexión entre la radiación y las observaciones y vivencias personales y diarias del alumnado. Esto busca sensibilizarlos sobre los riesgos y beneficios de la radiación ionizante y no ionizante.

OBJETIVOS



Las unidades tienen dos objetivos generales:

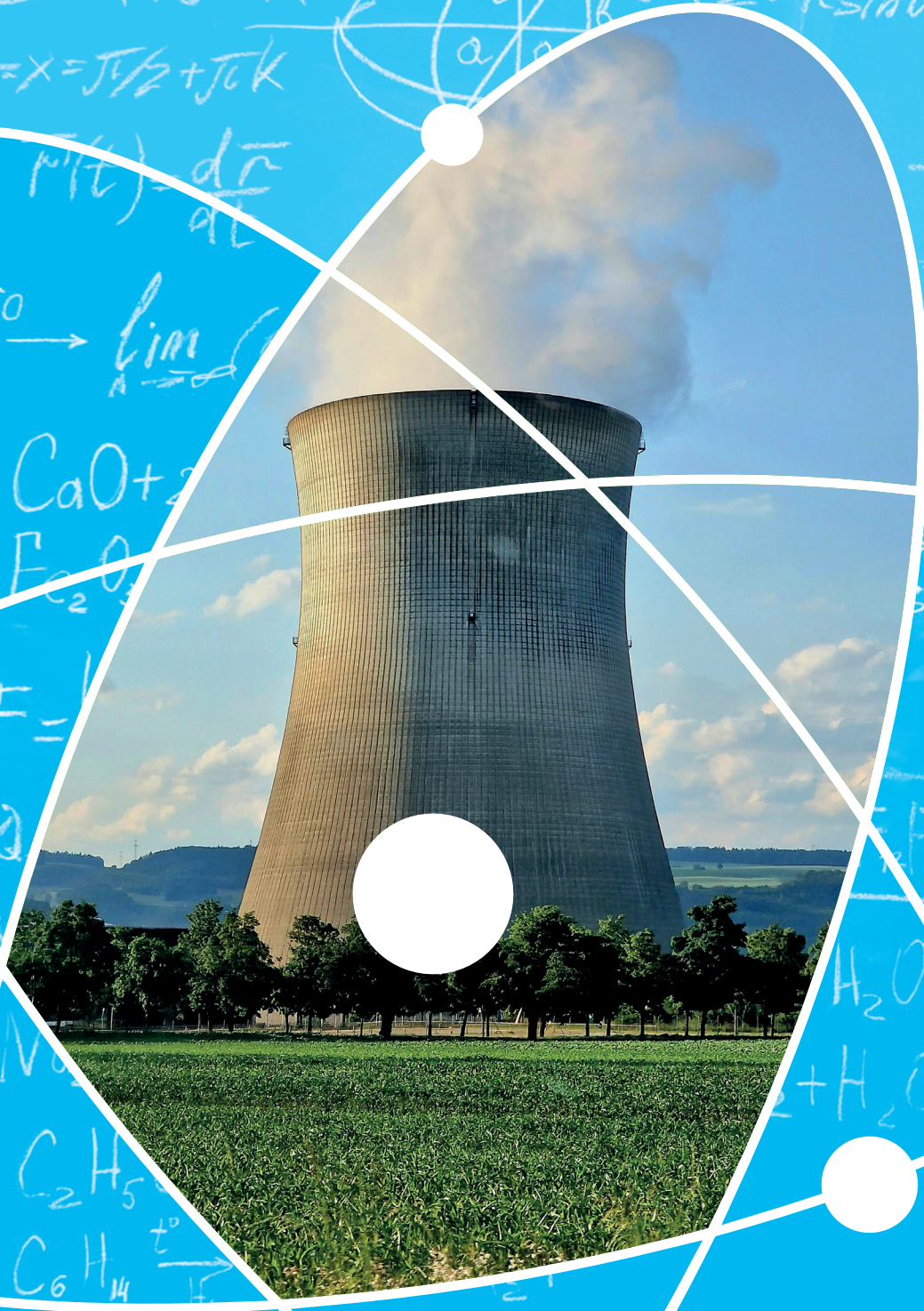
- Estimular el interés por fenómenos físicos imperceptibles.
- Familiarizar al alumnado con las distintas formas de radiación (ionizante y no ionizante) procedentes tanto de fuentes naturales como artificiales.

Por otra parte, cada unidad tiene sus objetivos específicos. Aunque las unidades pueden ser utilizadas por el profesorado de acuerdo con su propia visión y añadiendo sus aportaciones personales, en estas etapas dependerá mucho del interés y de la formación general de los alumnos, que variarán en función de sus intereses y motivaciones.

Para alcanzar estos objetivos, se han definido una serie de pautas destinadas a los profesores. En suma, estos deben:

- Hacerse una idea de la radiactividad y de la radiación ionizante y no ionizante como fenómeno físico y social.
- Conocer la diferencia entre radiación natural y artificial.
- Adquirir una idea de los principios de la protección radiológica.
- Desarrollar la capacidad de explicar la radiación de forma clara, con el fin de fomentar una actitud documentada y razonada en sus alumnos.

ESTRUCTURA



Como se ha señalado, la guía se divide en dos niveles, según la edad:

- Nivel I: alumnado de 12 a 16 años.
- Nivel II: alumnado de 16 a 18 años.

Cada nivel consta de siete unidades. Los textos contienen todos los materiales necesarios para que el profesorado imparta las distintas unidades y además al final de la guía se incluye un amplio suplemento técnico. Al comienzo de cada nivel se ofrece información de carácter general, seguida de una serie de ejercicios de evaluación para comprobar qué han aprendido los alumnos/as una vez concluido el nivel. Al principio de cada unidad se establecen los objetivos, se indica el tiempo mínimo necesario, se proponen formas de enseñar la unidad, y una serie de actividades para realizar en el aula (con respuestas cuando sea necesario).

Las páginas de este libro pueden ser fotocopiadas por el profesor para su distribución al alumnado. Contienen una explicación del tema acompañada de ilustraciones y figuras. Se ofrece asimismo un listado de los puntos clave (y los conceptos esenciales que deben ser aprendidos por los alumnos), seguido por una serie de actividades y preguntas sin las respuestas.

El suplemento técnico contiene información general sobre diversos aspectos de la radiación ionizante y no ionizante que se tratan en las distintas unidades. Esta información general va dirigida al profesorado y trata de ser tan clara y tan objetiva como sea posible. Al suplemento le sigue un glosario, una bibliografía y una lista de direcciones útiles.

Una vez más, hay que subrayar que las unidades pretenden únicamente constituir un ejemplo de cómo ilustrar determinados aspectos de la radiación y de la protección radiológica. Cada profesor/a podrá utilizarlas o adaptarlas de la forma que considere más adecuada.

CONTENIDO



NIVEL	BREVE DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	TEMAS ABORDADOS	TÍTULOS DE LAS UNIDADES
NIVEL I Alumnado de 12 a 16 años	Consta de siete unidades dirigidas a un alumnado de enseñanza secundaria obligatoria. Contiene información sobre la radiación electromagnética, los distintos tipos de radiación en función de su energía, así como su procedencia de origen natural y artificial, estructura del átomo, diferentes aplicaciones de las radiaciones ionizantes, manera de detectar esta radiación, y cómo obtener energía de origen nuclear.	Se tratan los siguientes temas: • Radiación electromagnética: espectro. Radiación ionizante y no ionizante. • El átomo y las radiaciones ionizantes. • Medios para detectar y medir las radiaciones ionizantes. • Efectos sobre el cuerpo humano. • Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en: medicina, industria e investigación. • Energía nuclear.	**Unidad 1** La radiación está en todas partes **Unidad 2** ¿Qué es la radiación ionizante? **Unidad 3** ¿Cómo detectar la radiación ionizante? **Unidad 4** ¿Cómo afecta a nuestro cuerpo la radiación ionizante? **Unidad 5** Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes **Unidad 6** Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en industria e investigación **Unidad 7** Obtención de energía de origen nuclear
NIVEL II Alumnado de 16 a 18 años	Consta de siete unidades dirigidas a un alumnado de enseñanza secundaria no obligatoria (bachillerato y formación profesional). Contiene información más detallada que en el nivel anterior y se profundiza en el tema de las medidas de protección radiológica y, además, se incluye una unidad específica para el tema de los residuos radiactivos.	Se tratan los siguientes temas: • Radiación de origen natural y artificial. • Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. • Protección radiológica: principios y medidas de protección. • Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en: medicina, industria, construcción, investigación y seguridad. • Obtención de energía de origen nuclear. • Gestión de los residuos radiactivos.	**Unidad 1** Radiación ionizante en la vida diaria **Unidad 2** La radiación ionizante y sus efectos biológicos **Unidad 3** Protección contra la radiación **Unidad 4** Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes **Unidad 5** Otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes **Unidad 6** Obtención de energía de origen nuclear **Unidad 7** Los residuos radiactivos

NIVEL I





Consta de siete unidades para el alumnado de 12 a 16 años.

INFORMACIÓN

En cada unidad se propone un texto que sirve de guion al profesorado para explicar a los alumnos/as diferentes aspectos relacionados con las radiaciones: qué es la radiación, cómo diferenciar los distintos tipos de radiación, procedencia de las radiaciones ionizantes, cómo medirlas, identificar sus efectos sobre el cuerpo humano y sus aplicaciones en distintos campos como medicina, industria, investigación o para la obtención de energía. Es importante que en este nivel el alumnado adquiera conocimientos sobre los distintos tipos de radiación que les rodean y sepan identificar sus efectos y aplicaciones.

En cada unidad se indican, al margen, aquellas palabras que se consideran claves en el texto, excepto en la unidad 6, que por la sencillez de las materias tratadas se considera que los títulos ya constituyen las palabras claves. Asimismo, al final de cada unidad aparece un apartado titulado “puntos clave”, donde se recogen las principales ideas del tema.

UNIDADES NIVEL I

Unidad 1. **La radiación está en todas partes**

Unidad 2. **¿Qué es la radiación ionizante?**

Unidad 3. **¿Cómo detectar la radiación ionizante?**

Unidad 4. **¿Cómo afecta a nuestro cuerpo la radiación ionizante?**

Unidad 5. **Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes**

Unidad 6. **Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en industria e investigación**

Unidad 7. **Obtención de energía de origen nuclear**

EVALUACIÓN

Cada unidad consta de una serie de actividades con las que se puede comprobar el grado de adquisición de los conocimientos. Se puede pedir a los alumnos que amplíen la información buscando, por ejemplo, en Internet, lo que les permitirá, además, aplicar sus habilidades en el uso de las nuevas tecnologías.

Al terminar este nivel los alumnos/as deben:

- Definir el concepto de radiación y las distintas clasificaciones de las fuentes de radiación: natural y artificial, ionizante y no ionizante.
- Describir el origen, la energía y el poder de penetración asociados a cada uno de los tipos de radiaciones ionizantes.
- Explicar que para medir la radiación ionizante se utilizan instrumentos especiales.
- Identificar los efectos biológicos asociados a la radiación ionizante y las medidas básicas de protección contra esa radiación.
- Enumerar las aplicaciones médicas de la radiación ionizante y diferenciar técnicas de radiodiagnóstico, de radioterapia y de medicina nuclear.
- Enumerar algunos ejemplos de aplicación de la radiación ionizante en la industria, alimentación, agricultura e investigación.
- Distinguir los conceptos de fisión y fusión.
- Poder describir el funcionamiento general de una central nuclear e indicar sus partes fundamentales, asociándolas a la función que realizan.
- Diferenciar entre centrales nucleares de agua en ebullición y de agua a presión.
- Nombrar que existe un proyecto para la obtención de energía nuclear de fusión llamado “proyecto ITER”.
- Citar que existe el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares.

UNIDAD 1. LA RADIACIÓN ESTÁ EN TODAS PARTES

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Describirá el concepto de radiación.
- Identificará las características de una onda (energía, frecuencia y longitud de onda).
- Nombrará ejemplos de ondas mecánicas y ondas electromagnéticas.
- Distinguirá entre fuentes de radiación natural y artificial.
- Distinguirá entre fuentes de radiación ionizante y no ionizante.
- Nombrará las principales aplicaciones de las radiaciones (ionizantes y no ionizantes).

Tiempo mínimo propuesto

2 horas.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad pueden consultarse los capítulos 1 y 3 del suplemento técnico (introducción histórica y espectro de ondas electromagnéticas: radiación ionizante y no ionizante).

Para más información, pueden consultarse las siguientes páginas:

- Comisión Internacional de Protección Radiológica contra las Radiaciones no Ionizantes (http://www.icnirp.org/)

- Comisión Internacional de Protección Radiológica (http://www.icrp.org/)

Sugerencias didácticas

En esta unidad se analizan los aparatos y técnicas que utilizan radiaciones, y que los alumnos conocen y manejan a diario, para ilustrar que, efectivamente, la radiación está en todas partes.

La unidad comienza con la definición de radiación como forma de energía, diferenciando la radiación electromagnética (ondas electromagnéticas) de las ondas mecánicas. A continuación, se estudian las características de cualquier onda (energía, frecuencia y longitud de onda). Estas características permiten clasificar las radiaciones electromagnéticas en el espectro.

En la segunda parte de la unidad se aborda el estudio de las radiaciones. En este punto es importante analizar el origen de la radiación (radiación natural o de fondo y radiación artificial) y distinguir entre radiación ionizante y no ionizante. Los ejemplos analizados ayudarán a la comprensión de estos conceptos.

Se puede introducir el tema preguntando a los alumnos/as qué tipos de radiaciones conocen, diferenciando las radiaciones de origen natural y artificial y las radiaciones ionizantes de las no ionizantes. También se puede preguntar si conocen el funcionamiento del móvil o cómo se envían las señales de televisión. Después los estudiantes pueden leer el tema, contestar a las preguntas y realizar las actividades propuestas. Para terminar, pueden definir, con sus palabras, los términos propuestos, cuya solución se puede consultar en el glosario.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué es la radiación?
   La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio a través de ondas electromagnéticas o partículas. Existen dos tipos principales: la radiación ionizante y la no ionizante.

2. Escribir dos ejemplos de ondas mecánicas y dos ejemplos de ondas electromagnéticas. ¿Cuál es la diferencia entre ambas?
   A continuación, se mencionan dos ejemplos de ondas mecánicas?
   - Ondas en el agua, por ejemplo, cuando tiras una piedra en un estanque o lago, se forman ondas mecánicas que viajan por la superficie del agua.
   - Ondas sísmicas, que son las que se producen durante un terremoto y que viajan a través de las rocas y suelos de la Tierra.

   Dos ejemplos de ondas electromagnéticas son:
   - La luz visible, que es la parte del espectro electromagnético que podemos ver con nuestros ojos.
   - Las ondas de radio, que nos permiten escuchar música en la radio.

   Las ondas mecánicas necesitan un medio, bien sea el agua, el aire o la Tierra, para propagarse. En cambio, las ondas electromagnéticas no necesitan un medio para su propagación, por lo que pueden viajar incluso en el vacío.

3. ¿Qué es la radiación de fondo? ¿Estás expuesto a ella?
   La radiación de fondo es la radiación de origen natural que siempre está presente en el ambiente. Esta proviene tanto de fuentes terrestres, como los isótopos radiactivos naturales presentes en las rocas, o bien del espacio, como los rayos cósmicos. Dado que esta radiación está presente todos los días, nosotros estamos expuestos de manera continua. Sin embargo, su cantidad es tan pequeña que no suele ser peligrosa para nuestra salud.

4. Enumera aplicaciones de la radiación ionizante en el campo de la medicina.
   Las radiaciones ionizantes se utilizan ampliamente en medicina con fines de diagnóstico o terapéuticos. Algunos ejemplos son:
   - Radiografías (rayos X). Se usan para ver, por ejemplo, fracturas en nuestros huesos, entre otros.
   - Tomografía axial computarizada (TAC). Se usan para ver en detalle los órganos internos y detectar problemas como tumores, enfermedades cardíacas o cerebrales.
   - Gammagrafía. Se usa para ver el funcionamiento de los órganos en ese preciso momento.
   - Radioterapia. Se usa para tratar enfermedades como el cáncer.

   Aunque estas aplicaciones implican el uso de radiación, las dosis utilizadas son controladas para los pacientes, ya que los beneficios para la salud (como diagnosticar o tratar enfermedades graves) superan los riesgos de la exposición.

Verdadero o falso

Responder verdadero o falso y justificar la respuesta.

1. Las ondas de radio se utilizan en los sistemas de comunicaciones.
   Verdadero. Las ondas de radio son un tipo de onda electromagnética, y se utilizan en muchos sistemas de comunicación, como la radio, la televisión y los teléfonos móviles. Pueden viajar largas distancias sin necesidad de cables.

2. La radiación infrarroja de origen natural es la que nos llega del Sol y nos calienta.
   Verdadero. Es una forma de energía que no podemos ver, pero podemos percibir en forma de calor. Proviene del Sol y llega a la Tierra en forma de luz infrarroja.

3. Las ondas utilizadas por el Wi-Fi son una forma de radiación no ionizante.
   Verdadero. El Wi-Fi utiliza ondas de radio para transmitir datos a través del aire. Por tanto, estas ondas son una forma de radiación no ionizante, por lo que no tienen suficiente energía para arrancar los electrones de los átomos ni causar daño directo a las células.

4. Las radiaciones no ionizantes no producen efectos perjudiciales en el ser humano.
   Falso. Las radiaciones no ionizantes (ondas de radio, luz visible y rayos infrarrojos) no son en general peligrosas porque no tienen la suficiente energía para dañar células de nuestro cuerpo. Sin embargo, su mal uso puede dar lugar a posibles efectos perjudiciales. Por ejemplo, la exposición prolongada a radiación infrarroja (tomar el sol) puede dañar la piel.

UNIDAD 1

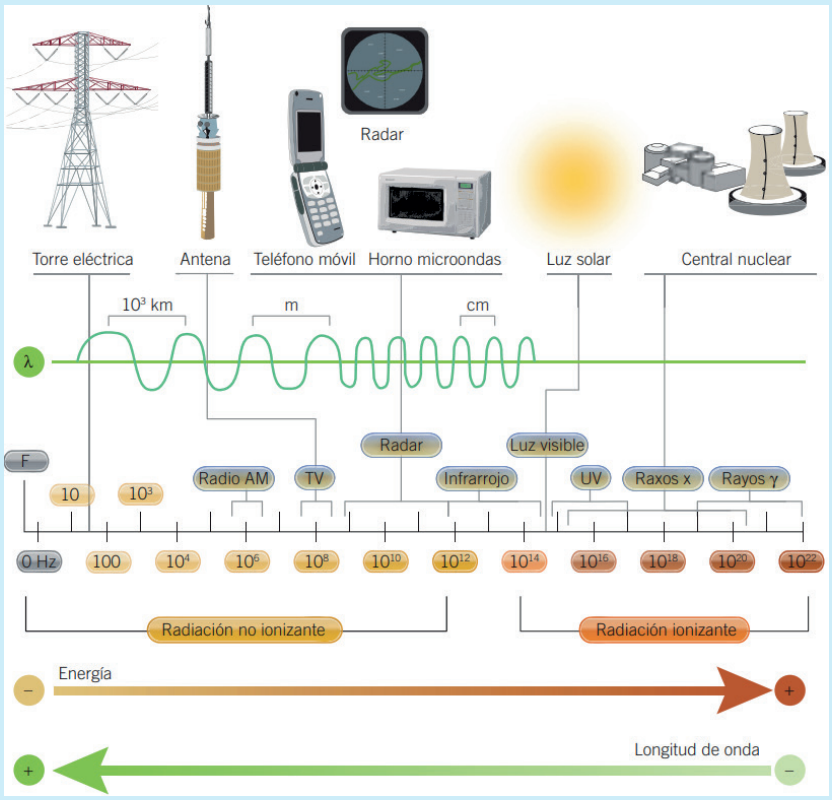
FICHA DEL PROFESORADO

Actividades complementarias

1. Escribir las distintas fuentes de radiación electromagnética en la columna correspondiente.

	Radiación ionizante	Radiación no ionizante
Origen natural	- Rayos cósmicos (provenientes del espacio). - Radón (gas radiactivo natural).	- Rayos del sol (luz visible, infrarrojos, rayos UVA).
Origen artificial	- Radiografías (rayos X). - Radiodiagnóstico. - Radioterapia. - Medicina nuclear (tratamiento con fármacos radiactivos artificiales). - Centrales nucleares.	- Redes de alta tensión, aparatos eléctricos, placas de inducción, aparatos de resonancia magnética nuclear. - Radar, TV, radio, telefonía móvil. - Horno microondas. - Láser, alarmas. - Lámparas de bronceado.

2. Dibujar el espectro electromagnético, colocando en los extremos: + energía, – energía. Debajo de cada tipo de radiación escribir una aplicación que utilice esa radiación y distinguir las que son ionizantes de las no ionizantes.



UNIDAD 1. LA RADIACIÓN ESTÁ EN TODAS PARTES

Seguramente habéis oído o leído, tal vez en los medios de comunicación, información sobre la radiación. La radiación está presente en todas partes, sea cual sea el lugar en el que nos hallemos.

Desde el inicio de la vida en la Tierra, los seres vivos conviven y han estado en contacto con la radiación. Por ejemplo, sin la radiación del Sol no habría vida en nuestro planeta, ya que gracias a ella las plantas crecen y los seres vivos podemos calentarnos con la radiación infrarroja.

Además de las radiaciones naturales, los seres humanos hemos sido capaces de desarrollar aparatos para usar la radiación de diferentes maneras. Por ejemplo, cuando escuchamos la radio, hablamos por el móvil, calentamos la comida en el microondas, tostamos el pan en la tostadora o cuando nos hacen una radiografía para diagnosticar una fractura de un hueso, estamos usando radiación.

¿Qué es la radiación?

La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio a través de ondas electromagnéticas o partículas.

¿Qué es una onda electromagnética?

Para saber qué es una onda electromagnética tenemos que entender qué es una onda mecánica. Estas últimas son un tipo de onda que necesita un medio material, como el agua, el aire o la tierra, para propagarse.

Por ejemplo, cuando tiramos una piedra en un estanque o lago, esta crea unas ondas en el agua que se expanden hacia la orilla. Si contamos el ritmo con el que las olas llegan a la orilla podremos saber la frecuencia. Además, si observamos una ola y medimos la distancia entre la cresta (la parte más alta) de una ola y la cresta de la ola siguiente, esa distancia se llama longitud de onda. En la Tierra también podemos encontrar ondas mecánicas que se propagan a través de la corteza terrestre, como las ondas sísmicas que se producen durante un terremoto.

Ahora que ya sabemos qué son las ondas mecánicas, podemos aplicar estos conceptos a las ondas electromagnéticas. Pero hay una diferencia principal entre ambas: mientras que las ondas mecánicas se propagan a través de un medio, como el agua o la corteza terrestre, las ondas electromagnéticas no necesitan un medio para hacerlo, e incluso se pueden transmitir a través del vacío. Una onda electromagnética es una forma de transportar energía, y un ejemplo, es la luz. Sabemos que la luz puede calentar y que una llama azul calienta más

que una llama roja. Así pues, las ondas electromagnéticas pueden transportar energía en forma de calor.

Cuanto mayor sea la frecuencia de una onda electromagnética, mayor será su energía. Las ondas electromagnéticas se pueden dividir en dos tipos principales según su frecuencia o energía que posean:

- Por un lado, encontramos las radiaciones ionizantes, que tienen suficiente energía como para modificar (producir ionizaciones) de los átomos del material que atraviesan (material irradiado). Los rayos X y la radiación cósmica son ejemplos de radiaciones ionizantes.
- Por otro lado, nos encontramos con las radiaciones no ionizantes, que no tienen suficiente energía para producir ionizaciones en enlaces atómicos. Por ejemplo, las ondas de radio o la luz visible.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro, tal y como se puede observar en la figura 1.1.1, es decir, desde ondas de baja frecuencia (o longitudes de onda largas) hasta las ondas de alta frecuencia (o longitudes de onda cortas). A medida que aumenta la frecuencia o disminuye la longitud de onda, el espectro electromagnético se compone por la transmisión de energía eléctrica, las ondas de radio, la televisión, el radar, las microondas, la radiación infrarroja (la sentimos como calor), la luz visible (la vemos con nuestros ojos), la radiación ultravioleta (la del Sol), los rayos X, los rayos gamma y los rayos cósmicos.

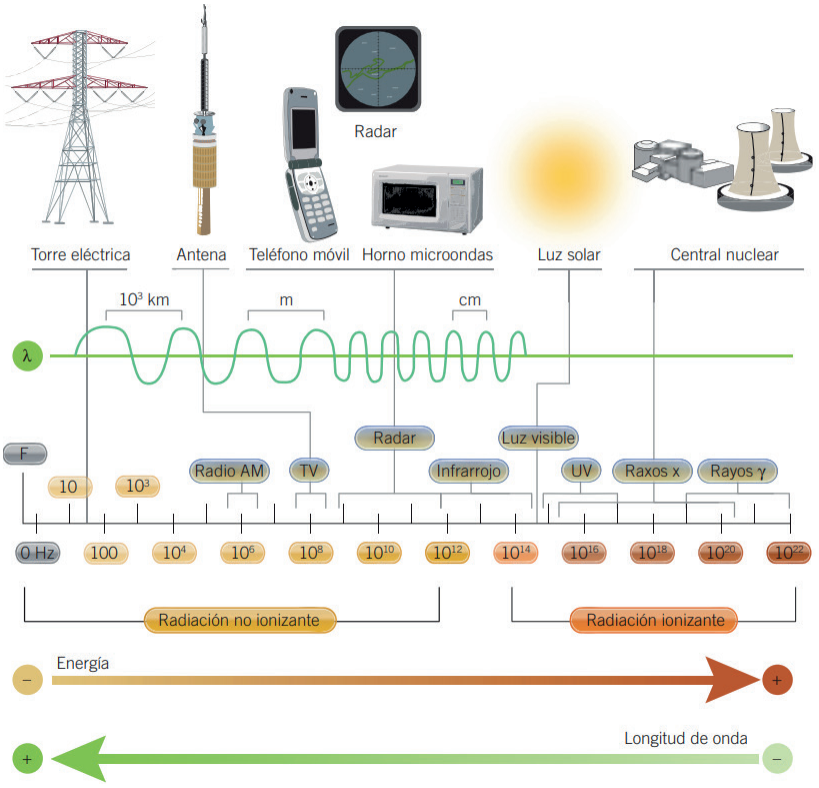


Figura 1.1.1. Espectro electromagnético.

La radiación no ionizante

Las radiaciones no ionizantes producidas por el ser humano tienen muchas aplicaciones en nuestra vida diaria. A continuación, se exponen las cuatro regiones del espectro en las que se dividen estas radiaciones, comenzando por las menos energéticas.

a) Ondas de baja frecuencia: son las producidas por las redes de alta tensión, los electrodomésticos, los aparatos médicos como los de resonancia magnética y las cocinas de inducción. Estas ondas tienen menos energía que las ondas de radio.

b) Ondas de radiofrecuencia: se encuentran las ondas que usamos para transmitir señales de radar, radio, televisión y para dispositivos domésticos. Las ondas de radio son ondas electromagnéticas generadas artificialmente por circuitos oscilantes. Son ondas muy útiles para las comunicaciones, como, por ejemplo:
   - Las ondas de radio de baja frecuencia se usan para la transmisión de televisión.
   - Las ondas de frecuencia más larga se usan para las radios.
   - Las ondas de longitud media son menos reflejadas por la atmósfera y se usan en los teléfonos móviles. Para aumentar su cobertura y que lleguen más lejos, se utilizan antenas repetidoras.
     Para determinar la dirección en que se encuentra el objeto se utilizan antenas parabólicas, que tienen la capacidad de recibir solo impulsos que corresponden a un ángulo específico de dirección.
     El radar es un dispositivo de localización de objetos. Se basa en la medición del tiempo que tarda en volver, una vez reflejado en un objeto, una señal de radiofrecuencia que ha enviado el propio radar. Si se conoce la velocidad de propagación de las ondas enviadas, es fácil conocer la distancia a la que se encuentra el objeto de que se trate. Actualmente, muchos radares funcionan mediante longitudes de onda que corresponden a la frecuencia de las microondas en lugar de las ondas de radio.

c) Microondas: se encuentran entre las ondas de radio y los infrarrojos, con longitudes de onda de 30 cm a 0,3 mm. Tienen baja energía, pero son muy útiles. Las ondas microondas se usan en los hornos microondas para calentar y cocinar elementos. Esto se debe a que estas ondas interactúan con la materia, incrementando la velocidad de rotación de las moléculas. Por lo tanto, hacen vibrar las moléculas de agua presentes en los alimentos, lo que genera calor.

d) Radiaciones ópticas: son más energéticas que las microondas y están relacionadas con la luz visible, la zona central del espectro. Dentro de este grupo se encuentran:
   - Luz visible, que corresponde a los colores del arcoiris.

- Radiación infrarroja, que no podemos ver, pero sí sentir como calor. Es una radiación de origen natural y proviene del Sol. La radiación infrarroja artificial se usa en tecnologías como el láser. Tiene muchas aplicaciones, desde cirugías médicas hasta calefacción en casas y fábricas o alarmas y sistemas de control a distancia.
- Radiación ultravioleta (UV), donde se encuentra el 5 % de la radiación de origen solar que penetra en la atmósfera. Puede usarse para desinfectar agua o tratar ciertas enfermedades de la piel.

El mal uso de las radiaciones no ionizantes puede dar lugar a posibles efectos dañinos en el cuerpo humano. Por eso, en 1992 se creó la Comisión Internacional de Protección Radiológica contra las Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP), que se encarga de asesorar e informar sobre los riesgos potenciales en la salud producidos por la exposición a este tipo de radiación. Establece directrices internacionales sobre los límites de la exposición humana para todos los campos electromagnéticos, con inclusión de la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja.

La radiación ionizante

Los seres vivos recibimos radiación ionizante de origen natural procedente de los rayos cósmicos, de los elementos radiactivos que forman parte de la corteza terrestre y con los que construimos nuestras viviendas, puentes, calles, etc., y de los elementos radiactivos que hay en el agua y en los alimentos que ingerimos, haciendo que se incorporen a nuestro organismo.

Desde comienzos del siglo XX, a esta radiación natural, o de “fondo”, se le ha sumado la radiación ionizante artificial que el ser humano aprendió a producir para satisfacer sus necesidades e intereses. Las radiaciones ionizantes tienen aplicaciones muy importantes en industria, investigación y medicina. En la industria se utiliza para la esterilización de alimentos, para conocer la composición y estructura interna de diversos materiales, para detectar errores de fabricación y ensamblaje, entre otras aplicaciones.

Las centrales nucleares producen energía eléctrica a partir de reacciones en las que se emiten radiaciones ionizantes. En el campo de la medicina, las radiaciones ionizantes también cuentan con numerosas aplicaciones beneficiosas para el ser humano. Con ellas se pueden realizar una gran variedad de estudios diagnósticos y terapéuticos. La Medicina Nuclear y el Radiodiagnóstico utilizan las radiaciones para diagnóstico, por ejemplo, cada vez que nos hacen una radiografía, un TC (tomografía computerizada) o una gammagrafía. La Medicina Nuclear y la Radioterapia también utilizan las radiaciones con fines terapéuticos como es el uso de los aceleradores lineales de electrones para combatir enfermedades como el cáncer.

Debido a los efectos peligrosos de una exposición excesiva a la radiación ionizante, un grupo de radiólogos pertenecientes a la Sociedad Internacional de Radiología creó en 1928 la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), que desde 1950 tiene asignada la misión de establecer las bases científicas y principios generales en que se sustenta la protección radiológica.

Puntos clave

La radiación es una realidad que se encuentra en todas partes y estamos muy familiarizados con ella.

Podemos distinguir entre fuentes de radiación ionizante y fuentes de radiación no ionizante, y dentro de ellas las que son de origen natural o de origen artificial.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué es la radiación?

2. Escribir dos ejemplos de ondas mecánicas y dos ejemplos de ondas electromagnéticas. ¿Cuál es la diferencia entre ambas?

3. ¿Qué es la radiación de fondo? ¿Estás expuesto a ella?

4. Enumerar alguna aplicación de la radiación ionizante en el campo de la medicina.

Verdadero o falso

Responder verdadero o falso y justificar la respuesta:

1. Las ondas de radio se utilizan en los sistemas de comunicaciones.

2. La radiación infrarroja de origen natural es la que nos llega del sol y nos calienta.

3. Las ondas utilizadas por el Wi-Fi son una forma de radiación no ionizante.

4. Las radiaciones no ionizantes no producen efectos perjudiciales en el ser humano.

UNIDAD 1

FICHA DEL ALUMNADO

Actividades complementarias

1. Escribir las distintas fuentes de radiación electromagnética en la columna correspondiente.

	Radiación ionizante	Radiación no ionizante
Origen natural		
Origen artificial		

- Rayos del sol (luz visible, infrarrojos, rayos UVA).
- Radiografías (rayos X).
- Radar, TV, radio, telefonía móvil.
- Radioterapia.
- Láser, alarmas.
- Horno microondas.
- Rayos cósmicos (provenientes del espacio).
- Lámparas de bronceado.
- Medicina nuclear (tratamiento con fármacos radiactivos artificiales).
- Redes de alta tensión, aparatos eléctricos, placas de inducción, aparatos de resonancia magnética nuclear.
- Radiodiagnóstico.
- Radón (gas radiactivo natural).
- Centrales nucleares.

2. Dibujar el espectro electromagnético, colocando en los extremos: + energía,—energía. Debajo de cada tipo de radiación escribir una aplicación que utilice esa radiación y distinguir las que son ionizantes de las no ionizantes.

UNIDAD 2

FICHA DEL PROFESORADO

UNIDAD 2. ¿QUÉ ES LA RADIACIÓN IONIZANTE?

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Dirá que toda materia se compone de átomos.
- Citará la estructura del átomo (núcleo formado por neutrones y protones, y corteza, con los electrones orbitando).
- Asociará la inestabilidad del átomo a su estructura.
- Describirá que los átomos inestables emiten radiación ionizante.
- Identificará los tipos de radiaciones ionizantes y los clasificará en corpusculares y ondas electromagnéticas.
- Definirá el poder de penetración de cada tipo de radiación ionizante.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad pueden consultarse los capítulos 1 (Introducción histórica), 2 (Estructura del átomo) y 4 (radiactividad y radiación ionizante) del suplemento técnico.

Sugerencias didácticas

En esta unidad se trata de repasar la estructura del átomo y a partir de ella explicar el origen de la radiactividad que presentan algunos átomos. La unidad comienza con una breve reseña histórica, que puede ser ampliada para los alumnos/as de segundo ciclo de la ESO (se pueden incluir científicos como Thomson, Rutherford o Böhr). Es importante que los alumnos asocien la radiactividad de algunos átomos a su estructura inestable.

Se puede introducir el tema a través de la figura de Henry Becquerel, pidiendo a los alumnos/as que busquen información en Internet sobre cómo descubrió la radiactividad. Después se lee el tema en clase, el alumnado responde a las preguntas y realiza las actividades (es necesario tener acceso a Internet). Para finalizar pueden definir los términos propuestos, cuya solución se encontrará en el glosario.

Preguntas y respuestas

1. Citar dos científicos que se nombren en el texto, explicar qué descubrieron y en qué siglo vivieron.
   John Dalton demostró en el siglo XIX la existencia de los átomos, y Becquerel (que vivió entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX) descubrió la radiactividad.

2. Dibujar un átomo de litio (tres electrones, tres protones y cuatro neutrones). ¿Cuál es su número másico? ¿Y su número atómico?

3. Dibujar un átomo de berilio (cuatro electrones, cuatro protones y cinco neutrones). ¿Cuál es su número másico? ¿Y su número atómico?

4. ¿Qué es un elemento radiactivo?
   Es un elemento cuyo núcleo es inestable. Debido a esta inestabilidad emite radiación ionizante y se transforma en otro elemento.

5. ¿Qué es la radiación ionizante y por qué se llama así?
   Es la radiación emitida por los átomos inestables al transformarse en otros átomos. Se llama así porque cuando esta radiación atraviesa la materia puede arrancar electrones de los átomos que se encuentran en su camino. A la acción de arrancar electrones de un átomo se le llama ionización y de ahí el nombre de radiación ionizante.

6. Describir los tipos de radiaciones ionizantes que existen.
   - Alfa: emisión de núcleos de helio: 2 protones + 2 neutrones.
   - Beta: emisión de electrones β^- o de su antipartícula, positrones β^+.
   - Neutrones: emisión de partículas con masa y sin carga eléctrica.
   - Rayos X: onda electromagnética que se genera en la corteza de los átomos.
   - Rayos gamma: onda electromagnética que se genera en la desintegración de núcleos radiactivos.

Búsqueda en Internet

1. Buscar la información necesaria para completar la siguiente tabla.

Radiación	Poder de penetración / Material	Penetración en el cuerpo humano
α (alfa)	5 cm en aire	Capas exteriores de la piel
β (beta)	1 cm en aluminio	1 cm o 2 cm
γ (gamma)	Varios metros en hormigón	Atraviesa el cuerpo humano
rayos X	Varios metros en hormigón	Atraviesa el cuerpo humano
neutrones	Mayor poder de penetración que los rayos X	Atraviesa el cuerpo humano

2. Buscar información sobre el matrimonio Curie. ¿Qué relación tienen con Becquerel?
   Los tres descubrieron y estudiaron elementos radiactivos: el uranio, Becquerel; y el polonio y el radio, el matrimonio Curie.
   A través de la figura de Marie Curie se puede resaltar la labor científica de las mujeres. Marie Curie ha sido (hasta la fecha) la única persona que ha recibido dos premios Nobel en distintas disciplinas científicas (uno en física y otro en química).

3. Buscar información sobre las aplicaciones de los rayos X y de los rayos gamma. ¿Es útil la radiación ionizante?

Definir los siguientes términos

- Átomo: la parte más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos. Está constituido por partículas más pequeñas: electrones, protones y neutrones.
- Protón: partícula del núcleo del átomo que tiene carga eléctrica positiva.
- Electrón: partículas de la corteza del átomo con carga eléctrica negativa.
- Neutrón: partícula del núcleo del átomo que no tienen carga eléctrica.
- Número másico: cantidad total de partículas del núcleo (protones y neutrones), que se representa por la letra A, y se escribe en la parte superior izquierda del símbolo químico.
- Número atómico: número de protones del núcleo que se representa por la letra Z y se escribe en la parte inferior izquierda del símbolo químico.
- Radiactividad: son las transformaciones que se producen en el núcleo de los átomos en las que se libera gran cantidad de energía en forma de radiaciones ionizantes. Llamadas también desintegraciones.

UNIDAD 2. ¿QUÉ ES LA RADIACIÓN IONIZANTE?

¿Qué tipos de radiación conoces? En la primera unidad hemos aprendido que la radiación puede ser ionizante o no ionizante. La radiación ionizante no se puede percibir con los sentidos. Pero si no podemos verla, olerla, oírla ni sentirla, ¿cómo sabemos que existe? ¿Qué es la radiación ionizante? En esta unidad encontrarás algunas de las respuestas. Pero antes, para entender qué es la radiación ionizante antes tenemos que entender qué es un átomo.

Ya en la Grecia antigua, mientras el filósofo Demócrito estudiaba la materia, descubrió que, si cogía un trozo de materia y lo iba dividiendo en pedazos cada vez menores, acabaría por llegar a un trozo diminuto que sería indivisible. A los trozos de materia indivisible los llamó átomos. Fue el primero que sugirió que todas las sustancias conocidas están formadas por átomos o combinaciones de ellos, pero no llegó a comprobarlo experimentalmente.

En el siglo XIX, John Dalton demostró la existencia de los átomos, entendiendo estos como la parte más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos. Todos los átomos de un mismo elemento son iguales, tienen la misma masa, y átomos de diferentes elementos tienen distinta masa.

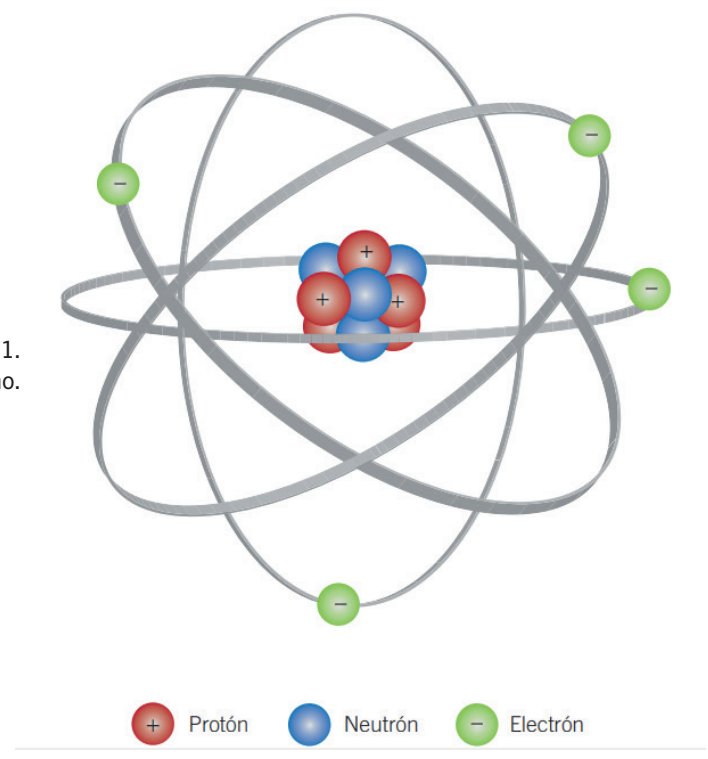


Figura 1.2.1.
Estructura del átomo.

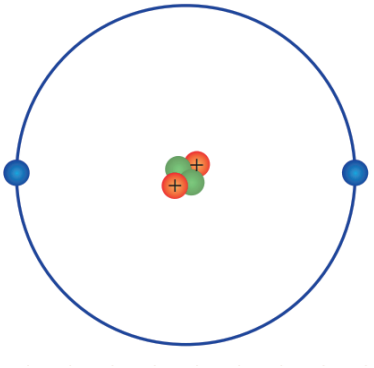
Posteriormente, con el desarrollo de la física nuclear en el siglo XX, se comprobó que el átomo estaba constituido por partículas más pequeñas: electrones, protones y neutrones. En cuanto a la estructura del átomo ha habido muchas teorías desde la antigüedad. Con cada teoría se explicaba algún aspecto de la física, pero no todos. Actualmente se acepta que el átomo tiene una estructura interna formada por un núcleo y una corteza o nube de electrones orbitando en torno al núcleo, figura 1.2.1.

El núcleo del átomo está formado por dos tipos de partículas: los protones, que tienen carga eléctrica positiva, y los neutrones, que no tienen carga eléctrica. En un átomo neutro, que es su estado habitual, el número de electrones es igual al número de protones. En la corteza, se encuentran los electrones, partículas con carga eléctrica negativa.

Como las cargas eléctricas iguales se repelen, igual que los polos magnéticos de igual signo de dos imanes, los protones tienen repulsión electromagnética, pero se mantienen unidos por la existencia de una fuerza más potente, denominada fuerza nuclear fuerte.

Prácticamente, toda la masa del átomo se encuentra en el núcleo, ya que los electrones tienen una masa 1835 veces menor que la del protón y el neutrón.

El núcleo más sencillo es el del hidrógeno, formado por un protón, el núcleo siguiente es el del helio, que puedes ver en la figura 1.2.2. En esta figura vemos un átomo de helio. Tiene un núcleo formado por dos protones, dos neutrones y alrededor del núcleo giran dos electrones.



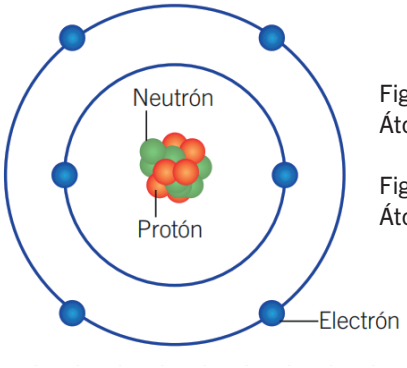


Figura 1.2.2.
Átomo de helio.

Figura 1.2.3.
Átomo de carbono.

Otro ejemplo podría ser un átomo de carbono, en la figura 1.2.3, que tiene seis protones y seis neutrones en su núcleo y seis electrones a su alrededor. Este es el aspecto de un átomo de carbono.

Al número de protones del núcleo se le denomina número atómico y se representa por la letra Z, que se escribe en la parte inferior izquierda del símbolo químico.

La cantidad total de partículas del núcleo (protones y neutrones) es el número másico, que se representa por la letra A, y se escribe en la parte superior izquierda del símbolo químico.

Existen átomos con igual número atómico pero distinto número másico, a los cuales se les conoce como isótopos. Por ejemplo, existen tres isótopos naturales del hidrógeno, el protio (hidrógeno-1), el deuterio (hidrógeno-2) y el tritio (hidrógeno-3). Todos poseen las mismas propiedades químicas (las del hidrógeno) y se diferencian en algunas propiedades físicas. Hay tantos átomos como elementos químicos, lo que supone algo más de un centenar. Por ejemplo, el hidrógeno, el carbono, el hierro y el uranio...

En condiciones normales de equilibrio, las partículas del núcleo del átomo permanecen fuertemente unidas, es como si estuvieran atadas. Pero un exceso o una falta de neutrones puede romper ese equilibrio. Entonces se convierten en elementos inestables, con tendencia a transformarse en otros elementos. Estas transformaciones, llamadas también desintegraciones, se producen en el núcleo de los átomos liberando gran cantidad de energía en forma de radiaciones ionizantes, y este fenómeno se conoce con el nombre de radiactividad, descubierta por Becquerel en 1896.

Normalmente podemos medir la rapidez con que tiene lugar este proceso y expresarla utilizando una unidad especial denominada becquerel, que es la actividad de una cierta cantidad de material radiactivo que sufre una desintegración espontánea cada segundo. Se llama así en honor a Henri Becquerel.

Las radiaciones ionizantes emitidas por los átomos inestables se llaman así porque cuando atraviesan la materia pueden arrancar electrones de los átomos que se encuentran en su camino. Entonces, ese átomo ya no es eléctricamente neutro, puesto que ha perdido electrones, y se convierte en un ion. Se dice que este átomo ha sido ionizado.

Los tipos de radiaciones ionizantes que existen son (figuras 1.2.4 y 1.2.5):

- Las que se presentan en forma de partículas con masa (radiación corpuscular):

  - Radiación alfa: son núcleos de helio-4, que se emiten en ciertas desintegraciones nucleares (constituidas por dos neutrones y dos protones). Tiene mucha masa, pero es poco penetrante. Se detienen con una hoja de papel.

  - Radiación beta: son flujos de electrones (beta negativas) o positrones (beta positivas) liberados en determinadas desintegraciones nucleares. Tienen una masa menor que las partículas alfa, pero son un poco más penetrantes. Llegan a penetrar entre uno o dos centímetros en los tejidos vivos y se detienen con una lámina de aluminio.

- Neutrones: este tipo de radiación es muy penetrante debido a que no tiene carga eléctrica y es indirectamente ionizante. Se absorben con elementos químicos como el boro y el cadmio.

- Las que se presentan en forma de radiación electromagnética (sin carga ni masa):

  - Rayos X.
  - Rayos gamma.

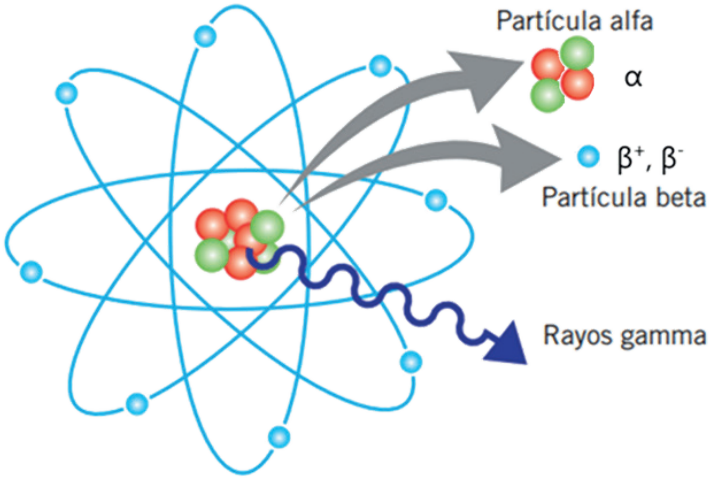


Figura 1.2.4.
Tipos de radiaciones ionizantes.

Son radiaciones muy penetrantes que se detienen mediante gruesos muros de hormigón o de plomo. La diferencia entre los rayos X y los rayos gamma solo está en su procedencia. Los rayos gamma proceden de un núcleo atómico inestable mientras que los rayos X, un poco menos penetrantes que los rayos gamma, proceden de las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones.

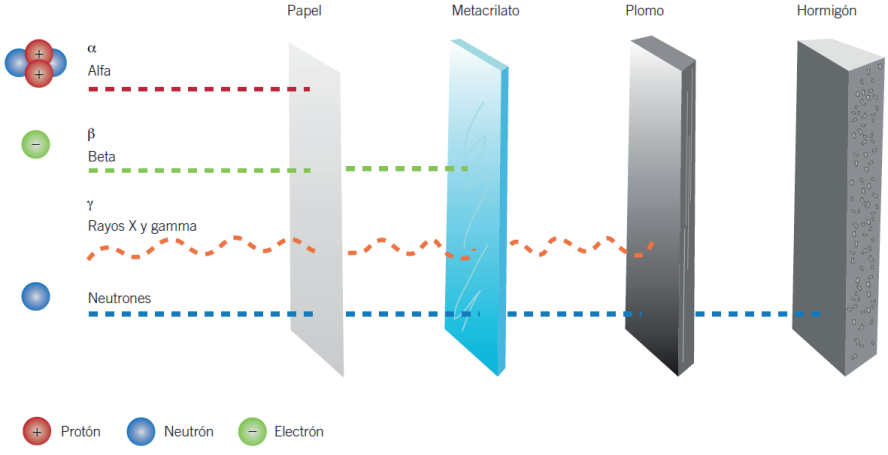


Figura 1.2.5.
Poder de penetración de las radiaciones ionizantes

UNIDAD 2

FICHA DEL ALUMNADO

PUNTOS CLAVE

- **Los núcleos atómicos inestables se desintegran y emiten radiación ionizante.**
- **La unidad de actividad, igual a una desintegración por segundo, se llama becquerel.**
- **Las radiaciones ionizantes son capaces de ionizar la materia que atraviesan (arrancan electrones de los átomos que se encuentra en su camino convirtiendo esos átomos en iones).**
- **Los tipos principales de radiación ionizante son la radiación alfa, beta, neutrónica, rayos X y gamma. Estos tipos de radiación difieren en el grado de penetración en la materia.**

Preguntas y respuestas

1. Cita dos científicos que se nombren en el texto y explica qué descubrieron y en qué siglo vivieron.
2. Dibuja un átomo de litio (tres electrones, tres protones y cuatro neutrones). ¿Cuál es su número másico? ¿Y su número atómico?
3. Dibuja un átomo de berilio (cuatro electrones, cuatro protones y cinco neutrones). ¿Cuál es su número másico? ¿Y su número atómico?
4. ¿Qué es un elemento radiactivo?
5. ¿Qué es la radiación ionizante y por qué se llama así?
6. Describe los tipos de radiaciones ionizantes que existen.

Búsqueda en Internet

1. Busca la información necesaria para completar la siguiente tabla.

Radiación	Poder de penetración / Material	Penetración en el cuerpo humano

2. Busca información sobre los esposos Curie. ¿Qué relación tienen con Becquerel?

3. Busca información sobre las aplicaciones de los rayos X y de los rayos gamma. ¿Es útil la radiación ionizante?

Define los siguientes términos:

- Átomo
- Protón
- Electrón
- Neutrón
- Número másico
- Número atómico
- Radiactividad

UNIDAD 3

FICHA DEL PROFESORADO

UNIDAD 3. ¿CÓMO DETECTAR LA RADIACIÓN IONIZANTE?

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Identificará que la radiación ionizante no se puede percibir por los sentidos.
- Interpretará que para medir la radiación ionizante se necesitan instrumentos especiales.
- Definirá el concepto de actividad de una fuente radiactiva y su unidad de medida.
- Diferenciará entre “dosis absorbida”, “dosis equivalente” y “dosis efectiva”, asociando la unidad de medida correspondiente.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad puede consultarse el capítulo 4 (radiactividad y radiación ionizante) del suplemento técnico.

Sugerencias didácticas

Esta unidad trata de las técnicas y los instrumentos empleados para detectar la radiación ionizante. Se explica el concepto de actividad de una sustancia radiactiva y en qué unidad se mide, al igual que los conceptos de dosis absorbida y dosis efectiva (que tiene en cuenta el tipo de radiación y el órgano expuesto).

Se puede introducir el tema repasando magnitudes y unidades de medida (peso en kilogramos, longitud en metros, centímetros…). Se indica a los alumnos/as que, en este tema, van a conocer las unidades utilizadas para medir magnitudes

asociadas con la radiación ionizante (actividad en becquerel, dosis absorbida en grays y dosis equivalente y dosis efectiva en sievert). A continuación, los alumnos/as leen el texto, contestan a las preguntas y realizan las actividades propuestas.

Preguntas y respuestas

1. ¿Cómo se mide la radiación ionizante?
   Con unos instrumentos especiales que detectan los efectos que la radiación produce sobre la materia. Estos instrumentos se denominan detectores de radiación ionizante.

2. ¿Cómo funcionan los detectores de radiación ionizante?
   En los detectores de radiación ionizante existen sustancias cuyas características físico-químicas cambian al interaccionar con las radiaciones ionizantes.

3. ¿Qué mide la actividad de una fuente radiactiva? ¿En qué unidad se mide la actividad?
   La actividad nos indica lo intensa que es la fuente. Se mide en becquereles (desintegraciones/segundo).

4. ¿Qué es la dosis absorbida, la dosis equivalente y la dosis efectiva? ¿En qué unidades se mide?
   La dosis absorbida nos indica la energía depositada en el medio por unidad de masa. Se mide en gray (Gy).
   La dosis equivalente es la dosis absorbida en un órgano o tejido, ponderado en función del tipo y calidad de la radiación, y nos indica los diferentes daños que una misma dosis absorbida puede causar en un órgano o tejido, dependiendo del tipo de radiación ionizante y de la energía que tenga. Se mide en sievert (Sv).
   La dosis efectiva es la suma ponderada de las dosis equivalentes en las distintas partes del cuerpo a causa de las irradiaciones internas y externas. Nos indica el riesgo global en el organismo humano. Se mide en sievert (Sv).

UNIDAD 3

FICHA DEL PROFESORADO

Verdadero o falso

Es conveniente que en esta actividad los alumnos/as justifiquen la respuesta cuando es falsa, argumentando correctamente.

1. Podemos sentir la radiación ionizante.
   Falso. La radiación ionizante es invisible, silenciosa, no huele ni sabe a nada y tampoco se puede tocar.

2. Podemos notar los efectos de algunos tipos de radiaciones no ionizantes, como los infrarrojos y los rayos UVA.
   Verdadero.

3. La actividad de una fuente radiactiva se mide en becquereles, que es una unidad grande.
   Falso. La actividad se mide en becquereles pero es una unidad pequeña, por eso se emplean los kilobecquereles.

4. Henry Becquerel descubrió la radiactividad.
   Verdadero.

5. El pan o el café emiten radiactividad.
   Verdadero. En cantidades muy pequeñas.

UNIDAD 3. ¿CÓMO DETECTAR LA RADIACIÓN IONIZANTE?

En la unidad anterior has aprendido qué es la radiación ionizante. No podemos verla, olerla, oírla ni sentirla. ¿Pero cómo sabemos que está ahí? En esta lección mostraremos las formas de detectar ese tipo de radiación.

La radiación ionizante es invisible, silenciosa, no huele ni sabe a nada y tampoco se puede tocar, es decir, no se puede detectar con nuestros sentidos. Sin embargo, este tipo de radiación está presente a nuestro alrededor, e incluso, dentro de nosotros mismos hay sustancias que emiten radiación ionizante. La radiación ionizante puede producir efectos sobre las personas y sobre el medio ambiente. Por ello, es importante detectarla, identificarla y medir en qué cantidad está presente.

Si nuestros sentidos no pueden detectarla, ¿qué podemos hacer para controlar las radiaciones que nos rodean? Los científicos han desarrollado unos instrumentos que permiten saber si estamos en presencia de radiaciones ionizantes y medirlas, basándose en los efectos que la radiación ionizante produce sobre la materia. Estos instrumentos se denominan detectores de radiación ionizante.

Los efectos que producen las radiaciones ionizantes sobre la materia son muy complejos. Algunos efectos que producen determinadas radiaciones no ionizantes, como pueden ser la radiación ultravioleta e infrarroja del Sol, nos resultan muy cotidianos. Por ejemplo, nuestra piel se pone morena al exponerse al sol, como consecuencia de la acción de la radiación solar sobre las células de la misma. Pues bien, en los detectores de radiación ionizante existen sustancias cuyas características físico-químicas cambian al interaccionar con las radiaciones ionizantes. Algunos ejemplos son los gases que se convierten en conductores de electricidad, sustancias que emiten luz, etc.



Figura 1.3.1.
Monitores de radiación y contaminación, y dosímetro de solapa.

Distintos instrumentos medidores de radiación.

Dosímetro personal.

En función de las características de los detectores, reciben diferentes nombres: cámara de ionización, contador proporcional, contador Geiger-Müller, contador de centelleo, dosímetro, etc. Algunos ejemplos de ellos se muestran en la figura 1.3.1.

Los detectores nos permiten conocer y definir muchas características de las radiaciones, como son su actividad y su energía, y nos orientan sobre los posibles efectos que pueden producir en el organismo.

Actividad: la actividad de una fuente radiactiva nos proporciona una idea de lo intensa que es dicha fuente. A modo de ejemplo, podríamos comparar la actividad de una fuente radiactiva con el nivel de batería de una cámara de fotos, esto es, si la batería está llena podremos hacer muchas fotos, mientras que si la batería se agota no podremos hacer ninguna.

Medir en becquerel: la actividad de las fuentes radiactivas se mide en unas unidades que se denominan becquereles, en honor del científico Henry Becquerel, descubridor de la radiactividad. Un becquerel equivale a la desintegración de un núcleo por unidad de tiempo, es decir, desintegraciones/segundo (dps). Sin embargo, el becquerel (Bq) es una unidad muy pequeña y por eso, se suele hablar de kilobecquereles (kBq), ya que utilizar el becquerel sería como medir longitudes o distancias en micras.

Como se puede ver en la figura 1.3.2, en un simple trozo de pan se pueden detectar 70 Bq de radiactividad, y en un kilo de café, 1000 Bq.

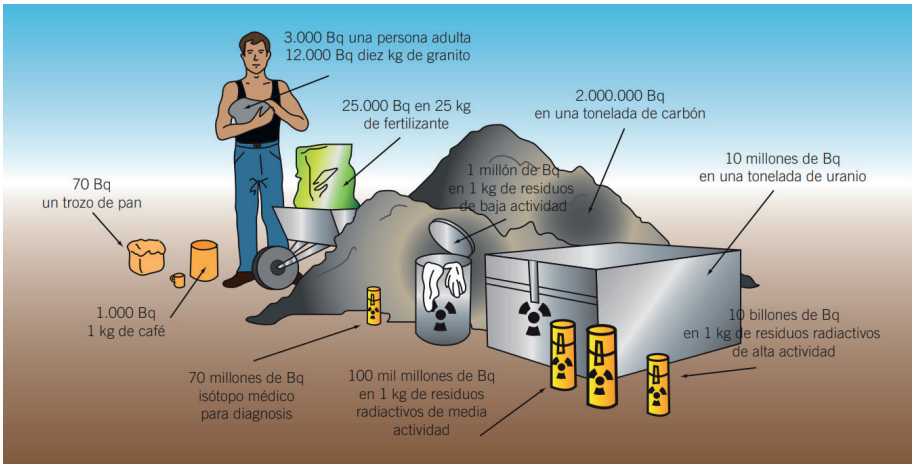


Figura 1.3.2. Actividad de diferentes residuos radiactivos.

Dosis: para predecir de forma aproximada los posibles efectos que pueden producir las radiaciones en el organismo, se utiliza el concepto de dosis. Para entender estas características, vamos a proponer a modo de ejemplo un juego, que se muestra en la figura 1.3.3.

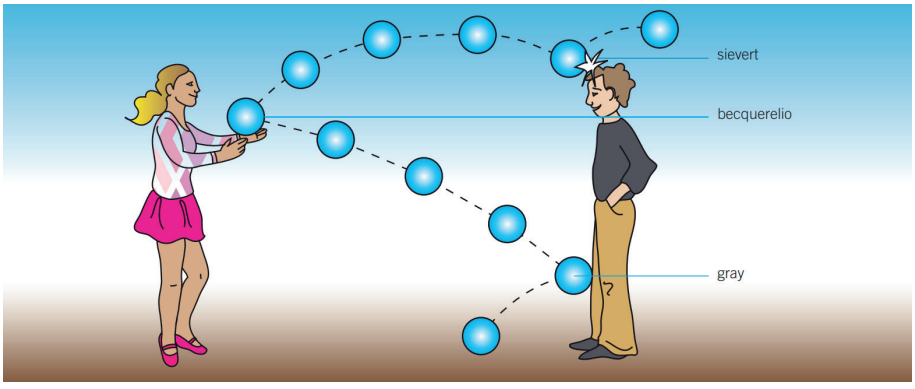


Figura 1.3.3. Representación simplificada de la relación entre las tres unidades que miden la radiactividad y las dosis de radiación ionizante (becquerel, gray y sievert).

Una chica está lanzando globos rellenos de agua a un chico. La velocidad con la que los lanza representa la actividad. Los globos lanzados, podrán seguir distintos caminos:

- Algunos globos golpearán al chico, rompiéndose en ese momento y mojándole.
- Otros globos, tras chocar con él, caerán al suelo sin haberse roto, por lo que no habrán conseguido el objetivo de mojarle.
- El resto, por su peso, caerán directamente al suelo, sin tocarle.

Viendo lo mojado que está el chico, podríamos hacernos una idea de la "dosis" de agua que ha recibido.

Cuando hablamos de radiaciones ionizantes, no todas tienen la misma fuerza ni representan el mismo peligro. Por eso, al hablar de dosis, tenemos que diferenciar el tipo de radiación ionizante que la está ocasionando: partículas alfa, beta, neutrones, rayos X o rayos gamma. Siguiendo con nuestro ejemplo, no es lo mismo que los globos estén llenos de aire que de agua: al chocar con el cuerpo, apenas notaremos el impacto de un globo lleno de aire, mientras que si está lleno de agua el daño será mayor.

Pero, además, no todas las partes del cuerpo son igualmente sensibles a este tipo de radiación. El mismo globo lleno de agua no nos hace el mismo daño si nos da en la cara que si lo hace en una pierna.

UNIDAD 3

FICHA DEL ALUMNADO

La magnitud que determina la energía media absorbida en el medio por unidad de masa se representa como **dosis absorbida, "D"**. Se mide en **grays (Gy)**. En el campo de la protección radiológica, es frecuente el uso del miligray (mGy), ya que el gray es una dosis elevada.

La dosis absorbida es insuficiente para expresar el efecto biológico que produce la radiación, ya que depende de las características de la radiación y del tejido expuesto. Para tener en cuenta estas dos realidades se utilizan dos magnitudes: dosis equivalente y dosis efectiva.

La **dosis equivalente, "H"**, es la dosis absorbida en un órgano o tejido "T", ponderada en función del tipo y calidad de la radiación, "R". Su unidad es el **sievert (Sv)**. El valor de la dosis equivalente permite comparar, desde el punto de vista de la protección radiológica, los diferentes daños que la misma dosis absorbida puede causar, en un órgano o tejido, dependiendo del tipo de radiación y de la energía de esta.

La **dosis efectiva (E)** es la suma ponderada de las dosis equivalentes en los distintos órganos y tejidos del cuerpo a causa de irradiaciones internas y externas. Se mide también en **sievert (Sv)**. El valor de la dosis efectiva, "E", nos da una información sobre el riesgo global en el organismo humano.

En el caso de fotones de todas las energías y electrones de todas las energías (como sería el caso de los rayos X y gamma), el factor de ponderación de la radiación es "1", de forma que en este caso "dosis absorbida" y "dosis equivalente" coinciden y se cumple la equivalencia 1 Sv = 1 Gy. Para otros tipos de radiaciones ionizantes el factor de ponderación no es uno, así por ejemplo para las partículas alfa es 20 y para los neutrones, según su energía va de 5 a 20.

PUNTOS CLAVE

- **Los sentidos del ser humano no son capaces de detectar por sí mismos la radiación ionizante, por lo que es necesario recurrir a una serie de instrumentos llamados detectores que nos avisan de la presencia de este tipo de radiaciones.**
- **Los detectores nos permiten conocer y definir muchas características de las radiaciones ionizantes, como su actividad y su energía, y nos orientan sobre los posibles efectos que pueden producir en el organismo.**
- **La actividad de las fuentes radiactivas se mide en unas unidades denominadas becquereles.**
- **Para expresar los posibles efectos que pueden producir las radiaciones ionizantes en el organismo, se utiliza el concepto de "dosis".**
- **La "dosis absorbida" determina la energía media absorbida en el medio por unidad de masa. Se mide en grays (Gy).**

- **Para tener en cuenta el efecto biológico que produce la radiación se utilizan dos magnitudes:**
- **La dosis equivalente y la dosis efectiva. Ambas se miden en sievert (Sv).**
- **La dosis equivalente es la dosis absorbida en un órgano o tejido ponderada en función del tipo y calidad de la radiación.**
- **La dosis efectiva es la suma ponderada de la dosis equivalente en los distintos órganos y tejidos del cuerpo a causa de irradiaciones internas y externas.**

Preguntas y respuestas

1. ¿Cómo se mide la radiación ionizante?

2. ¿Cómo funcionan los detectores de radiación ionizante?

3. ¿Qué mide la actividad de una fuente radiactiva? ¿En qué unidad se mide la actividad?

4. ¿Qué es la dosis absorbida, la dosis equivalente y la dosis efectiva? ¿En qué unidades se mide?

Verdadero o falso

Es conveniente que en esta actividad los alumnos/as justifiquen la respuesta cuando es falsa, argumentando correctamente.

1. Podemos sentir la radiación ionizante.

2. Podemos notar los efectos de algunos tipos de radiaciones no ionizantes, como los infrarrojos y los rayos UVA.

3. La actividad de una fuente radiactiva se mide en becquereles, que es una unidad grande.

4. Henry Becquerel descubrió la radiactividad.

5. El pan o el café emiten radiactividad.

UNIDAD 4. ¿CÓMO AFECTA A NUESTRO CUERPO LA RADIACIÓN?

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Diferenciará la radiación no ionizante (luz visible, infrarrojos, radiación ultravioleta, ondas de radio y televisión, onda larga) y la radiación ionizante.
- Identificará los distintos tipos de radiaciones ionizantes (rayos alfa, beta, gamma y rayos X).
- Describirá el origen, la energía y el poder de penetración asociados a cada uno de los tipos de radiaciones ionizantes.
- Distinguirá los distintos tipos de efectos biológicos asociados a la exposición a las radiaciones ionizantes.
- Identificará las medidas básicas de protección contra los efectos debidos a la radiación ionizante.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los efectos biológicos de la radiación ionizante y la protección radiológica, puede consultarse el capítulo 5 del suplemento técnico (efectos biológicos de la radiación y aspectos legales).

Sugerencias didácticas

Esta unidad comienza repasando los tipos de radiación no ionizante y los efectos que producen para, a continuación, entrar en el estudio más detallado de la radiación ionizante. Los efectos que este tipo de radiación pueden producir en el cuerpo humano se explican en la última parte de la unidad.

Se puede introducir el tema preguntando al alumnado qué tipos de radiaciones conocen y qué efectos producen, diferenciando las radiaciones ionizantes de las no ionizantes. Después los y las estudiantes leen el tema, contestan a las preguntas y realizan las actividades propuestas. Para finalizar pueden definir con sus palabras los términos propuestos, cuya solución se encuentra en el glosario.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué diferencia fundamental encuentras entre radiación ionizante y no ionizante?
   La radiación ionizante es capaz de producir ionizaciones en los átomos, es decir, arrancar electrones de su corteza externa y por lo tanto variar su estructura. La radiación no ionizante es demasiado débil para producir cambios en la estructura del átomo.

2. ¿De qué factores depende el daño que la radiación ionizante produce en el cuerpo humano?
   El daño depende del tipo de:
   - El tipo de radiación ionizante a la que está expuesto el cuerpo humano (alfa, beta, gamma, rayos X, neutrones).
   - De que la fuente de radiación se haya incorporado dentro del cuerpo humano o sea externa a él.
   - De la cantidad de energía que esta radiación deposite en el cuerpo por unidad de masa (magnitud que se denomina dosis absorbida), la cual es función de la intensidad con que emita la fuente.
   - De el tiempo que se esté expuesto a ella.
   - De la distancia a la misma si se trata de una fuente externa.

   Además, depende de otros factores, como los órganos concretos que se irradian, la edad y el estado de salud del individuo.

3. ¿Cuáles son los tipos de radiaciones ionizantes que se citan en el texto? ¿Cuáles pueden atravesar el cuerpo humano?
   Los tipos de radiaciones ionizantes que se citan son: la radiación alfa, la radiación beta, la radiación gamma y los rayos X. La radiación ionizante que puede atravesar el cuerpo humano es la radiación gamma y la radiación X.

4. ¿Cómo se clasifican los efectos biológicos asociados a la exposición a radiaciones ionizantes?
   Reacciones tisulares (es decir, en los tejidos) o efectos deterministas: se producen cuando la exposición a radiaciones ionizantes origina la muerte de tal cantidad de células de un tejido u órgano que da lugar a un mal funcionamiento. La aparición de estos efectos se produce solo cuando la dosis supera un cierto valor denominado “umbral de dosis”.

Efectos estocásticos: si debido a la exposición a radiaciones ionizantes, se producen transformaciones celulares, estas pueden dar lugar a la aparición de cáncer o enfermedades hereditarias en los descendientes de las personas expuestas. Para estos efectos no existe umbral de dosis, pero la probabilidad de que aparezcan sí depende de la dosis. Una vez que han aparecido, su gravedad tampoco depende de la magnitud de la dosis.

5. ¿Cuáles son los órganos más sensibles a la radiación?
   Entre los órganos más sensibles a la radiación ionizante están los ovarios, testículos, cristalino, médula ósea, colon, pulmón, estómago y mama.

Verdadero o falso

Es conveniente que en esta actividad los alumnos/as justifiquen la respuesta cuando sea falsa, argumentando correctamente.

1. Los rayos UVA son un tipo de radiación ionizante.
   Falso. Son radiaciones no ionizantes. Son un tipo de radiación ultravioleta que se origina en el Sol.

2. La radiación alfa es muy penetrante.
   Falso. Tiene muy poco poder de penetración y se frena en las capas exteriores de la piel.

3. Los efectos biológicos asociados a la exposición a la radiación ionizante son los mismos siempre y son iguales para todas las personas.
   Falso. La aparición de los efectos biológicos depende de muchos factores, entre otros, el tipo de tejido expuesto a la radiación y la capacidad de reparación del mismo, la edad del individuo, su estado de salud y su predisposición genética.

4. Las medidas básicas de protección contra la radiación ionizante son: aumentar la distancia a la fuente de radiación, disminuir el tiempo de exposición y usar barreras de protección.
   Verdadero.

Definir los siguientes términos

- Radiobiología

La radiobiología es la ciencia que estudia los sucesos que se producen tras la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes, los mecanismos de que dispone el organismo para compensar o reparar estos efectos y las lesiones y efectos finales que se pueden producir.

- Rayos UVA

Son parte de las radiaciones procedentes del sol que nos alcanzan, de mayor energía que otras como la radiación visible, lo cual hace que puedan producir cambios permanentes en el tejido de la piel y puede causar enfermedades en ella como las quemaduras solares.

- Rayos gamma

Son radiaciones constituidas por ondas electromagnéticas de alta energía, originadas en el núcleo de los átomos radiactivos. Liberan poca energía por cada centímetro que atraviesan de tejido, lo que implica que pueden penetrar muy profundamente en ellos, e incluso atravesar el cuerpo humano. Para detener la radiación gamma se precisa un material pesado, como el plomo o barreras de hormigón.

- Rayos X

A diferencia de los rayos gamma, se originan en la zona de la corteza de los átomos, pero por lo demás tienen la misma naturaleza: es decir, son ondas electromagnéticas de alta energía, con gran poder de penetración, y para protegernos de ellas necesitamos interponer material pesado como el hormigón o el plomo.

UNIDAD 4

FICHA DEL ALUMNADO

UNIDAD 4. ¿CÓMO AFECTA A NUESTRO CUERPO LA RADIACIÓN?

La radiación ionizante, en función de su energía, puede producir en la materia que atraviesa un gran número de transformaciones químicas y físicas. Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de la interacción de la radiación con el organismo vivo.

Vamos a ver más de cerca cómo tienen lugar esos efectos. Para ello, en primer lugar, haremos una comparación con un tipo de radiación que no es ionizante, la radiación solar. Esta radiación no tiene suficiente energía para alterar la estructura del átomo o dañar directamente el ADN, pero sí puede afectar al cuerpo humano de otras formas, sobre todo si la exploración es prolongada o intensa.

Sentimos una parte de la radiación del Sol que llega a la Tierra porque nos calienta o porque al estar en el rango de energía o longitudes de onda al que nuestros órganos visuales son sensibles, hace posible que veamos los objetos. Sin embargo, hay otros rayos también procedentes del Sol, de energía algo superior pero que no son detectables por nuestro sistema visual, cuyos efectos no se notan tan fácilmente. Son los rayos ultravioleta o rayos UVA.

Cuando tomamos el sol, estos rayos hacen que nuestra piel produzca un pigmento que causa el bronceado. Hoy sabemos que la exposición excesiva al sol es peligrosa para la piel. La radiación ultravioleta de la luz solar penetra en la piel y puede producir cambios permanentes en el tejido ocasionando enfermedades. Las quemaduras solares constituyen el principal peligro para la piel, por consiguiente, debemos limitar la duración y la frecuencia de la exposición al sol.

Los rayos UVA pueden alcanzarnos aun estando en la sombra. Esto puede suceder, por ejemplo, cerca del agua, porque muchos de estos rayos, que son invisibles, se reflejan en ella. Es muy importante protegernos, especialmente a los niños, ya que en los primeros años de vida el efecto perjudicial de la luz solar alcanza sus cotas máximas. Las medidas de protección más eficaces son: usar protector solar, evitar la exposición en las horas de mayor intensidad de la radiación ultravioleta (entre las 10 y las 16 horas), usar gafas de sol con filtros ultravioleta para bloquear esta radiación y evitar daños oculares, gorras o sombreros, etc.

Por fortuna, la atmósfera, especialmente la capa de ozono, absorbe la mayor parte de los rayos UVA más peligrosos, que pueden causar enfermedades de la piel. Por tanto, resulta de gran importancia que la capa de ozono se mantenga lo más intacta posible, porque ofrece protección contra la radiación ultravioleta. Como ya se ha dicho, la radiación ultravioleta no es un tipo de radiación ionizante, ya que es demasiado débil para producir modificaciones en la corteza electrónica de los átomos: no es capaz de arrancar estos electrones ni dar lugar a átomos ionizados.

Propiedades de penetración de la radiación ionizante y forma en que afectan al cuerpo humano

La radiación ionizante, en función de su energía, puede producir en la materia que atraviesa un gran número de transformaciones químicas y físicas. El daño que la radiación ionizante puede producir en el cuerpo humano depende de factores como:

- La dosis absorbida, que mide la cantidad de energía por unidad de masa que una determinada radiación ha comunicado a un tejido u órgano del cuerpo humano. A mayor dosis absorbida, mayor daño o probabilidad de sufrirlo.
  La magnitud de esta dosis absorbida depende fundamentalmente del tiempo de exposición a la fuente de radiación, la posición de la misma (si se incorpora al organismo o, si es una fuente externa a él, su distancia al cuerpo), la intensidad con que emite la fuente y si existe algún material interpuesto entre dicha fuente y el cuerpo que atenúa la radiación.

- El tipo de radiación ionizante a la que está expuesto el cuerpo humano: alfa, beta, gamma, rayos X y neutrones.

- El órgano irradiado, pues la sensibilidad a la radiación es diferente para cada uno.

- La edad del individuo (los niños son más sensibles a la radiación que los adultos), su estado de salud, etc.

Describimos a continuación los tipos de radiación con sus propiedades de penetración (esquematizado en la figura 1.4.1) y la capacidad que tienen para causar un daño:

– **Radiación alfa.** Se trata de partículas que constan de dos protones y dos neutrones. Apenas tiene poder de penetración (hasta 5 cm en aire) y pueden detenerse interponiendo una lámina de papel. Se frena en las capas exteriores de la piel y no es peligrosa, a menos que los elementos que la emiten se introduzcan directamente en el organismo por ingestión o inhalación o a través de cortes o heridas. Una vez en el interior del organismo, si son partículas alfa de alta energía, su peligrosidad es elevada debida a su alto poder de ionización.

– **Radiación beta.** Son electrones libres que se generan en la desintegración de núcleos radiactivos. Tiene mayor poder de penetración que la radiación alfa; por ejemplo en tejido vivo, las partículas beta pueden penetrar hasta 1 cm o 2 cm dependiendo de su energía, y se detienen con láminas de aluminio o materiales similares, de bajo número atómico como el plástico. Los isótopos que emiten radiación beta y están situados en el exterior del cuerpo humano pueden ser perjudiciales para el tejido superficial (la piel) y cuando dichos isótopos penetran en el interior del organismo, pueden dañar diferentes órganos.

- **Radiación gamma.** Es una radiación electromagnética originada en el núcleo de los átomos radiactivos. Penetra profundamente en los tejidos, pero libera mucha menos energía por cada centímetro que recorre en los mismos que la radiación alfa o la beta, y por ello puede atravesar el cuerpo humano. Para detener la radiación gamma se precisa un material pesado, como plomo, hierro o barreras de hormigón.

- **Rayos X.** Son de la misma naturaleza que los rayos gamma, es decir, radiación electromagnética, pero se originan en la zona de la corteza de los átomos. Puede tener también gran penetración (esta viene determinada por su energía al igual que en el caso de los rayos gamma), y por tanto llega a atravesar el cuerpo humano.

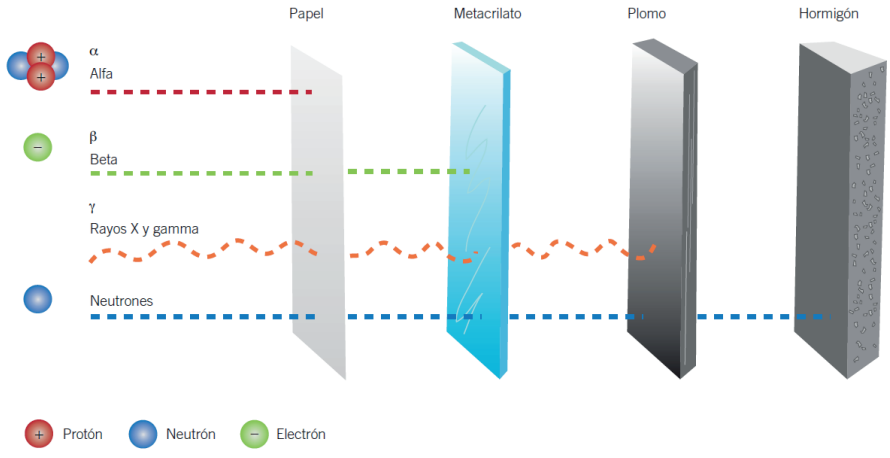


Figura 1.4.1. Atenuación de los diferentes tipos de radiación en distintos materiales.

Tipos de radiaciones ionizantes.

Medidas básicas de protección

Como medidas básicas de protección contra la radiación ionizante pueden citarse:

- La distancia: alejarse todo lo posible de la fuente de radiación, ya que la distancia a esta reduce significativamente la exposición.

- El tiempo de exposición: permanecer el menor tiempo posible cerca de la fuente de radiación reduce la dosis recibida.

- Uso de barreras de protección o blindajes: interponer entre la fuente de radiación y las personas una barrera que detenga o reduzca la radiación ionizante.

Efectos de la radiación ionizante en el cuerpo humano

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de la interacción de la radiación a nivel celular. La radiobiología es la ciencia que estudia los sucesos que se producen después de la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes, los intentos del organismo para compensar los efectos de esa absorción y las lesiones y reparaciones que se pueden producir en el organismo.

La aparición de estos efectos va a depender, entre otros factores, del tipo de tejido, y de la capacidad de reparación del mismo. También van a influir la edad del individuo en el momento de la exposición, su estado de salud y su predisposición genética. Por tanto, no todas las personas expuestas a radiaciones ionizantes tienen la misma respuesta.

Los efectos biológicos asociados con la exposición a radiaciones ionizantes se pueden clasificar en dos categorías:

- **Reacciones tisulares (en los tejidos) o efectos deterministas**: se producen cuando la exposición a radiaciones ionizantes origina la muerte de tal cantidad de células de un tejido u órgano que da lugar a un mal funcionamiento del mismo. La aparición de estos efectos se produce solo cuando la dosis supera un cierto valor denominado “umbral de dosis”. La gravedad del efecto va a depender de la dosis recibida. No todos los tejidos y órganos tienen la misma respuesta frente a las radiaciones ionizantes. Entre los más sensibles están los ovarios, testículos, cristalino y médula ósea. Entre los efectos tisulares podemos destacar, entre otros, las quemaduras y las cataratas.

- **Efectos estocásticos:** si debido a la exposición a radiaciones ionizantes, se producen transformaciones celulares (efectos como los que se ejemplifican en la figura 1.4.2), estas pueden dar lugar a la aparición de cáncer o enfermedades hereditarias en los descendientes de las personas expuestas. Para estos efectos no existe umbral de dosis, pero la probabilidad de que aparezcan sí depende de la dosis (la probabilidad aumenta cuanto mayor es la dosis absorbida). En cambio, una vez que aparece el efecto, su gravedad no depende de la dosis que lo ha originado.

UNIDAD 4

FICHA DEL ALUMNADO

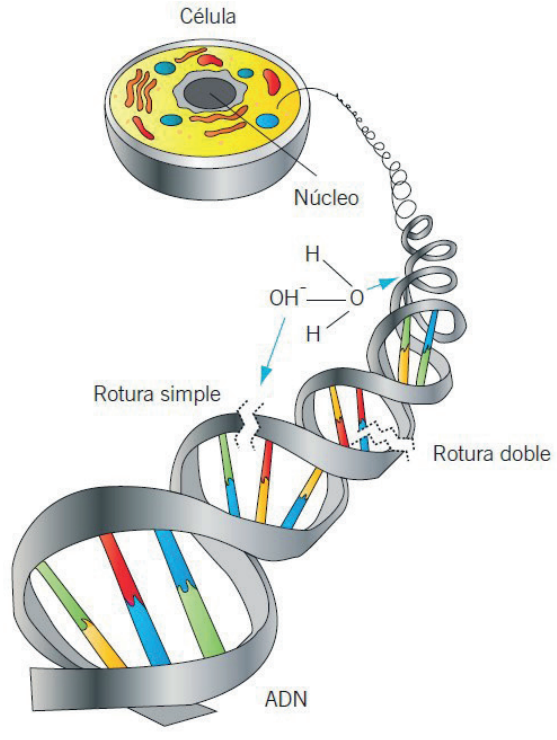


Figura 1.4.2. Efectos sobre la cadena de ADN en el núcleo celular.

Cadena de ADN.

PUNTOS CLAVE

- Las radiaciones ionizantes, en función de su energía, pueden producir en la materia que atraviesan un gran número de transformaciones químicas y físicas. Hay diferentes tipos de radiaciones ionizantes: alfa, beta, X y gamma.
- La distancia, el tiempo y el blindaje son las medidas básicas de protección frente a las radiaciones ionizantes.
- Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de la interacción de la radiación a nivel celular. Se pueden clasificar en dos categorías: tisulares y estocásticos.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué diferencia fundamental encuentras entre radiación ionizante y no ionizante?

2. ¿De qué factores depende el daño que la radiación ionizante produce en el cuerpo humano?

3. ¿Cuáles son los tipos de radiaciones ionizantes que se citan en el texto? ¿Cuáles pueden atravesar el cuerpo humano?

4. ¿Cómo se clasifican los efectos biológicos asociados a la exposición a radiaciones ionizantes?

5. ¿Cuáles son los órganos más sensibles a la radiación?

Verdadero o falso

Es conveniente que en esta actividad los alumnos/as justifiquéis la respuesta cuando es falsa, argumentando correctamente.

1. Los rayos UVA son un tipo de radiación ionizante.

2. La radiación alfa es muy penetrante.

3. Los efectos biológicos asociados a la exposición a la radiación ionizante son los mismos siempre y son iguales para todas las personas.

4. Las medidas básicas de protección contra la radiación ionizante son: aumentar la distancia a la fuente de radiación, disminuir el tiempo de exposición y usar barreras de protección.

Define los siguientes términos

- Radiobiología.
- Rayos UVA.
- Rayos gamma.
- Rayos X.

UNIDAD 5. APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Enumerará las aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes.
- Identificará las técnicas diagnósticas, tanto las que utilizan fuentes de radiación externas (equipos generadores de radiación) en el caso de radiodiagnóstico, como las técnicas basadas en fuentes de radiación que se administran al paciente para su captación y detección posterior, lo que constituye la medicina nuclear diagnóstica.
- Describirá en qué consisten las técnicas de radioterapia, por medio de generadores de radiación como los aceleradores y con fuentes encapsuladas, o bien con fuentes administradas al paciente, y cómo todas ellas se utilizan en el tratamiento contra el cáncer.
- Interpretará la necesidad de evaluar conjuntamente las ventajas y riesgos de la radiación ionizante en medicina.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad pueden consultarse los capítulos 5 y 7 del suplemento técnico (efectos biológicos de la radiación y aspectos legales y “otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes”).

Sugerencias didácticas

Esta unidad se puede introducir contando la historia del enfrentamiento de George de Hevesy (Premio Nobel de Química) con su patrona, en 1911. También se puede pedir a los alumnos/as que, una vez estudiado el tema, busquen en internet la biografía de George de Hevesy y preguntarles si encuentran alguna relación con los temas tratados en esta unidad.

La unidad se basa en el estudio de las aplicaciones médicas de la radiación ionizante, comenzando por los rayos X, técnica que seguramente muchos de ellos conocerán. Se pueden incorporar aquí las propias experiencias de los estudiantes. A lo largo del tema se explican otras técnicas menos conocidas y más modernas. Una vez leído el texto (es mejor hacer la lectura en voz alta ya que hay conceptos que requieren explicación), los alumnos/as pueden responder a las preguntas y realizar las actividades propuestas. Para terminar, se propone un debate o hacer una redacción con el tema de debate.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué tipo de radiación ionizante se utiliza en radiodiagnóstico? ¿Cómo se genera esta radiación? ¿Es radiación natural o artificial?
   En radiodiagnóstico se utilizan rayos X. Los rayos X se producen mediante equipos en los que se aplica una tensión determinada en un tubo de vacío, en el cual se está además generando un flujo de electrones, de manera que estos son acelerados. Su interacción con determinados materiales, cuando han alcanzado suficiente energía, produce la emisión de rayos X. Se trata, por lo tanto, de un tipo de radiación artificial.

2. ¿Qué es un radiotrazador? ¿Cómo y en qué aplicación se utiliza?
   Es un isótopo radiactivo que se introduce en el cuerpo del paciente y permite su seguimiento desde el exterior. Los trazadores se administran en dosis muy pequeñas, no tienen ninguna acción fármaco-terapéutica, ni efectos secundarios, ni reacciones adversas graves. Generalmente se administran por vía intravenosa al paciente, y se aprovecha que, bien el propio isótopo, o bien ciertas moléculas a las que se ha unido previamente, se fijan en un tejido, órgano o sistema determinado de manera selectiva.
   Posteriormente, se sitúa al paciente ante un equipo detector, ya sean las llamadas gammacámaras- SPECT o los detectores PET, para obtener la imagen diagnóstica (o más en general información metabólica o funcional), a partir de la detección de la radiación emitida por el radiotrazador que se ha incorporado en la zona a estudiar. El radiotrazador se elimina, generalmente, por la orina. La especialidad que lleva a cabo estos procedimientos se denomina medicina nuclear.

3. ¿Qué es la radioterapia?
   Es la aplicación de radiación ionizante en altas dosis para destruir las células cancerosas, concentrando esta dosis sobre una zona delimitada con gran precisión previamente. En el procedimiento se plantea también como objetivo principal evitar en lo posible la irradiación significativa del resto de órganos y tejidos sanos.

4. ¿Qué tipo de fuentes de radiación se emplean en cada una de las técnicas que has estudiado en el tema?
   En radiodiagnóstico la fuente de radiación es externa (un equipo generador de rayos X). En Medicina Nuclear la fuente se incorpora al organismo y no está encapsulada o encerrada por una cobertura estanca, sino que en general se distribuye o metaboliza, y en radioterapia la fuente puede ser externa (un generador de rayos X como son los aceleradores lineales) o pueden ser fuentes encapsuladas que se introducen, manteniendo su integridad, en cavidades o tejidos (lo que se conoce como braquiterapia).

5. Escribir cuatro condiciones que se deben cumplir a la hora de aplicar la radiación ionizante a un paciente
   Las exposiciones deben ser siempre necesarias y estar justificadas, deben realizarse con la mínima dosis posible, se deben llevar a cabo siempre bajo la responsabilidad de un especialista médico y debe prestarse especial atención a la justificación en embarazadas y niños.

Búsqueda en Internet

Investigar quién fue Röntgen, cuándo, dónde vivió y que descubrió.
Si se tiene acceso a internet durante la clase se puede mostrar alguna imagen característica de las radiografías que Röntgen hacía de la mano de su mujer, donde se puede apreciar su anillo.

Debate

Organizar un debate sobre las ventajas y posibles riesgos de la aplicación de las radiaciones ionizantes en medicina.

UNIDAD 5. APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

En un centro sanitario se utilizan diferentes tipos de radiaciones ionizantes para el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades. En algunos casos se usan equipos generadores de radiación ionizante, como son los equipos de rayos X para diagnóstico o aceleradores lineales de electrones, para tratamiento. En otros, se usan isótopos radiactivos, bien en forma de fuentes encapsuladas, también llamadas fuentes selladas (material radiactivo dentro de una cápsula hermética) o no encapsuladas (o fuentes abiertas, en general en forma líquida).

Radiodiagnóstico

Es la primera de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en Medicina, ya que poco tiempo después de que Roëntgen descubriera los rayos X se realizaron las primeras imágenes con fines de diagnóstico médico.

Se conoce con el nombre de radiodiagnóstico el conjunto de procedimientos de exploración y visualización de las estructuras anatómicas del interior del cuerpo humano mediante la utilización de los rayos X. Ocupa un lugar preponderante entre las técnicas de imagen debido al gran número de instalaciones, de exploraciones que se realizan y de profesionales que se dedican a esta especialidad.

Los rayos X se producen de forma artificial en un tubo de vacío, aplicando una determinada tensión (del orden de decenas o centenas de kV) entre dos electrodos, de manera que, al generar electrones mediante un filamento incandescente dentro del tubo, estos se aceleran al verse atraídos hacia el electrodo polarizado positivamente (llamado ánodo). Al interaccionar los electrones con el material que forma el ánodo, se generan los rayos X (se ilustra en la figura 1.5.1). Cuanto mayor es la tensión aplicada, mayor es la penetración de estos rayos X. La tensión aplicada puede variar desde 25 kV para la mamografía hasta 140 kV en radiodiagnóstico general.

La imagen radiográfica es una consecuencia de la diferente atenuación que las distintas estructuras anatómicas del paciente producen en el haz de rayos X que incide sobre él. Si a un paciente se le hace una radiografía de tórax, la parte de la radiografía correspondiente al pulmón estará más oscura que otra zona de la imagen a la que la radiación haya llegado tras atravesar el hueso, ya que los pulmones fundamentalmente tienen aire y este atenúa la radiación menos que el hueso. El tratamiento digital de la imagen puede invertir este contraste,

aparte de permitir mejorar en parte las imágenes obtenidas realzando detalles para hacerlos más visibles, suavizando zonas con exceso de ruido, modificando en general la escala de grises con la que se muestra la imagen, etc.

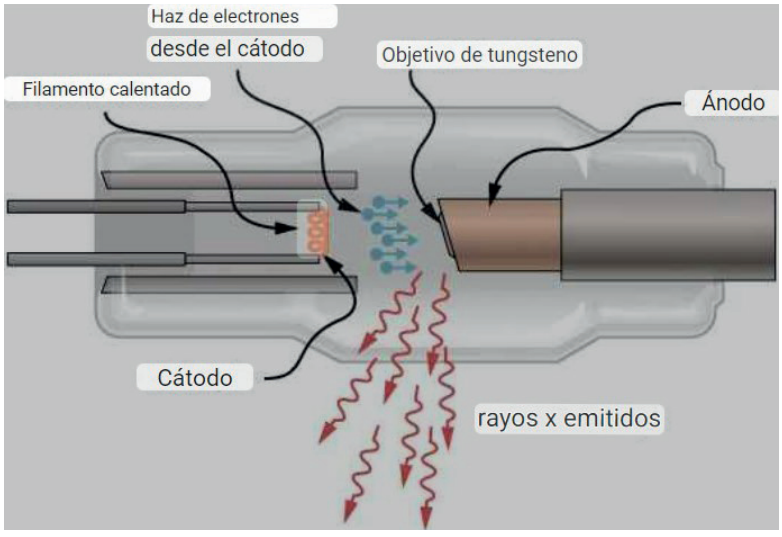


Figura 1.5.1. Esquema de los componentes fundamentales de un tubo de rayos X.

Hay muchos tipos de estudios radiográficos, según la anatomía explorada o el objetivo diagnóstico. Las pruebas de radiología convencional son las exploraciones más solicitadas, y entre ellas ocupan el primer lugar los estudios radiográficos de tórax, seguidos por los de columna.

Por otro lado, entre las pruebas que se conocen como radiología especializada, podemos destacar la mamografía, los procedimientos guiados por fluoroscopia como la radiología y cardiología intervencionista y la tomografía computarizada (TC). Esta última técnica consiste en una geometría de irradiación que gira alrededor del paciente, mediante la cual se obtiene información de atenuación en cortes transversales; aplicando algoritmos matemáticos se puede visualizar la anatomía interna del paciente en formas que redundan en una mejor capacidad diagnóstica, tal como se muestra en la figura 1.5.2. Pese a que entraña un mayor riesgo, pues implica que el paciente reciba una cantidad mayor de radiación que en la radiología convencional, sigue siendo la exploración óptima para muchos problemas clínicos de tórax, abdomen y columna vertebral. Además, es la exploración idónea para los traumatismos craneales y los accidentes cerebrovasculares.

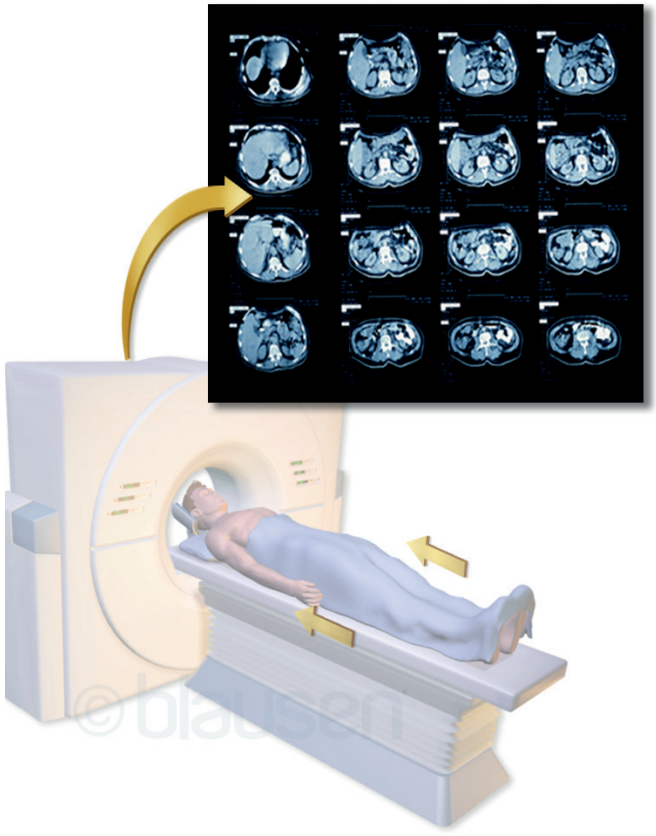


Figura 1.5.2.
Aspecto de un TC indicando la geometría del proceso de irradiación.

Medicina Nuclear

En Medicina Nuclear se usan los isótopos radiactivos (radioisótopos o radionucleidos) con fines tanto de diagnóstico como de tratamiento de diversas enfermedades. La Medicina Nuclear emplea fuentes no encapsuladas (también llamadas abiertas), generalmente en forma líquida, que se distribuyen o metabolizan en el organismo tras su administración.

– **Técnicas de diagnóstico:** en este caso, la asociación de los isótopos radiactivos con determinadas moléculas se suelen denominar trazadores o radiotrazadores, ya que no tienen ninguna acción fármaco-terapéutica, ni efectos secundarios, ni reacciones adversas graves, pues su objetivo es solo marcar en qué zona de un órgano o tejido se captan esas sustancias de manera preferente. Se administran por ello en cantidades muy pequeñas (las mínimas necesarias para permitir su seguimiento desde el exterior y la obtención de información suficiente para el diagnóstico).

El trazador más frecuentemente usado es el tecnecio-99m (m por metaestable), que se administra al paciente por vía intravenosa. Posteriormente, se sitúa al paciente ante un equipo detector, llamado gammacámara (o SPECT, por las iniciales en inglés de tomografía de emisión de fotón único, al que suele ir unido un equipo TC, mostrado en la figura 1.5.3), para obtener la imagen diagnóstica a partir de la detección de la radiación emitida por el radiotrazador que es captado por la zona a estudiar. El radiotrazador se elimina, generalmente, por la orina, y se eligen preferentemente aquellos cuyo periodo de semidesintegración es corto, para limitar la irradiación del paciente (por ejemplo, unas seis horas en el caso del Tc-99m). Mediante la utilización de la gammacámara se obtienen imágenes del órgano estudiado, que no son únicamente morfológicas, sino funcionales y morfo-funcionales.



Figura 1.5.3.
Equipo de detección SPECT-TC.

También han adquirido una importancia fundamental las exploraciones de PET (tomografía por emisión de positrones), en las que se administra un compuesto marcado con un emisor de positrones, generalmente el flúor-18 combinado en forma de fluorodesoxiglucosa (FDG). Tras un periodo de reposo necesario para que alcance las zonas de captación preferente, interacciona en ellas aniquilándose cada positrón con un electrón, lo que produce la emisión de dos fotones de la misma energía en direcciones opuestas: la detección de estos permite formar una imagen muy valiosa de estas zonas de captación, u obtener información funcional de las mismas.

– **Técnicas de terapia:** la Medicina Nuclear ha tenido una aplicación terapéutica muy extendida en el cáncer de tiroides y el hipertiroidismo, donde se aprovecha la afinidad que tiene el yodo para captarse de forma selectiva en la glándula tiroides, depositando una alta dosis de radiación en la misma y destruyendo el tejido tumoral (o reduciendo la actividad hormonal en el caso del hipertiroidismo).

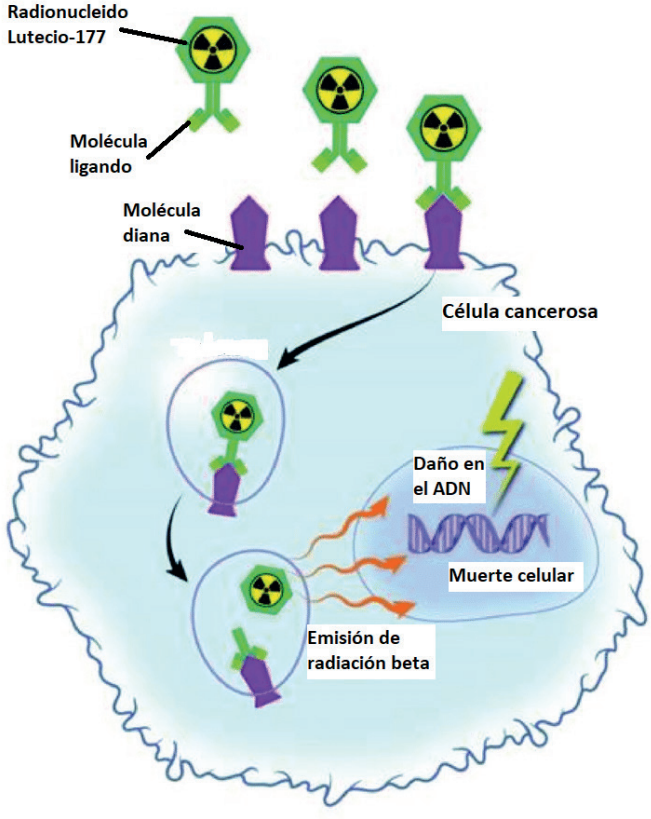


Figura 1.5.4. Esquema del fundamento de la terapia dirigida con radiofármacos.

En los últimos años se están introduciendo nuevos procedimientos de terapia, en los que se aprovecha la afinidad de determinadas moléculas, llamadas radioligandos, para unirse selectivamente a ciertas moléculas diana que están presentes específicamente en las células tumorales en mayor medida que en el resto de las células. Así se puede conseguir, uniendo a estos ligandos los radionucleidos adecuados para terapia (por ejemplo, el lutecio-177), la irradiación muy selectiva y dirigida de estos tejidos tumorales, como se expresa en la figura 1.5.4.

Como ventaja añadida, si se administra el mismo radioligando pero unido a otro radionucleido que tenga buenas propiedades como trazador, se puede conseguir una información diagnóstica muy precisa, obteniendo una idea previa de cómo va a ser la captación cuando se proceda a la terapia con ese radioligando. Esta relación tan estrecha entre los procedimientos de diagnóstico y terapia se conoce por ello como teragnosis.

Radioterapia

En radioterapia, la radiación ionizante se utiliza para destruir lesiones cancerosas tratando de limitar lo más posible los efectos adversos o toxicidad para el paciente. Para ello, se expone el tumor a dosis altas, procedentes de fuentes de radiación alejadas o a distancia en unos casos (radioterapia externa) o bien alojadas dentro de cavidades del paciente o insertadas en los tejidos, en otros (braquiterapia).

Las células que forman un tumor son células anormales y se dividen con gran rapidez, por lo que son muy sensibles y, por tanto, la radiación ionizante las destruye con más facilidad que a las células normales. Es de gran importancia aplicar al tumor la cantidad correcta de dosis de radiación y administrar al tejido circundante sano la menor dosis posible.

Se utilizan las siguientes fuentes de radiación ionizante:

- Equipos generadores de rayos X y aceleradores lineales de electrones: la radiación de un tubo de rayos X puede producirse con diferentes niveles de energía, de forma que el poder de penetración de la radiación ionizante puede ajustarse a la profundidad del tumor. Los aparatos de rayos X trabajan con tensiones o potenciales de aceleración de hasta 250 000 voltios (250 kV). Para un voltaje más elevado debe utilizarse un acelerador lineal de electrones que aumenta la energía de los electrones por etapas y puede alcanzar hasta 20 millones de voltios (20 MV) de potencial acelerador. En un acelerador pueden utilizarse para el tratamiento los propios electrones acelerados, aunque es mucho más frecuente hacer que estos generen fotones al interaccionar con un blanco, y emplear estos fotones para el

tratamiento (fotones similares a los producidos por los equipos de rayos X, pero de mucha mayor energía). Un ejemplo de acelerador lineal se muestra en la figura 1.5.5.



Figura 1.5.5. Acelerador lineal de electrones.

- Aceleradores de protones: la razón de emplear protones acelerados para la terapia es que, al ser partículas cargadas con una masa significativa, depositan gran parte de su energía en una zona muy concreta de su recorrido (el llamado "pico Bragg"), a una determinada profundidad de tejido según su energía, solo una pequeña parte de energía en el recorrido antes de llegar a este punto, y apenas nada más allá de él, concentrando así la dosis en el lugar deseado, e irradiando menos el tejido circundante.

- Braquiterapia: utiliza isótopos radiactivos en forma encapsulada (es decir, con una cubierta hermética que evita su dispersión), que pueden introducirse dentro del cuerpo del paciente, ya sea de forma momentánea o permanente, y que destruyen las células cancerosas preservando el tejido sano circundante, ya que las fuentes producen un gradiente de dosis muy alto a su alrededor. Se usan, el iridio-192, el cobalto-60, el yodo 125, o el paladio-103 entre otros.
  Estas fuentes están alojadas dentro de un equipo que proporciona un blindaje suficientemente seguro, unidas a él de manera que se proyectan y retraen al interior del equipo a voluntad y de forma remota, lo que evita irradiaciones del personal que participa en el procedimiento (se puede apreciar un equipo de este tipo en la figura 1.5.6, así como los aplicadores empleados para conducir la fuente en el interior del paciente en la figura 1.5.7).

UNIDAD 5

FICHA DEL ALUMNADO



Figura 1.5.6. Equipo proyector de fuentes de braquiterapia.

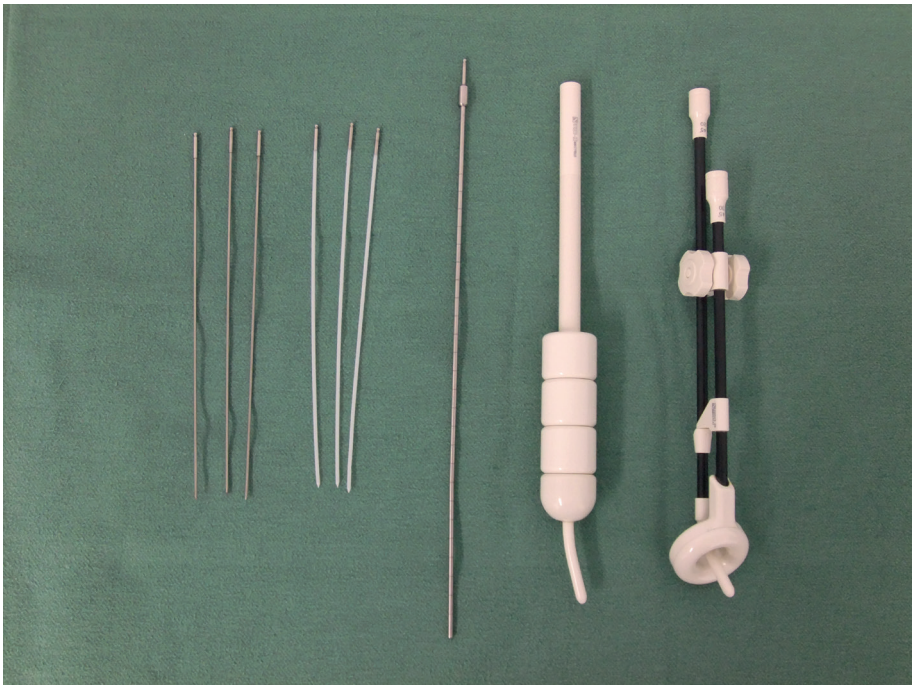


Figura 1.5.7. Guías y aplicadores usados en braquiterapia para alojar la fuente en el paciente.

En todo caso, y en relación con la seguridad o protección radiológica del paciente, es importante mencionar que la exposición de los pacientes a la radiación ionizante por causas médicas proporciona un gran beneficio diagnóstico o terapéutico, si bien siempre debe considerarse el posible daño que puedan causar. Por ello, es imprescindible que todas estas exposiciones:

- Deberán justificarse previamente, teniendo en cuenta los objetivos y las características de cada persona. Deberán mostrar un beneficio neto suficiente, teniendo en cuenta los posibles beneficios diagnósticos y terapéuticos que producen, frente al detrimento que pueda causar la exposición.
- Los procedimientos diagnósticos deben estar siempre optimizados a fin de obtener una imagen o información diagnóstica adecuada, con el objetivo de mantener las dosis individuales tan bajas como razonablemente sea posible. En el caso de los tratamientos, se deberá administrar la dosis prescrita en el volumen planificado a tratar, procurando mantener las dosis a los órganos y tejidos sanos lo más bajas que sea razonablemente posible, de acuerdo con el fin deseado del tratamiento. En cualquier caso, todos estos procedimientos deben realizarse a partir de protocolos establecidos que garanticen su calidad.
- Se lleven a cabo siempre bajo la responsabilidad clínica de un profesional sanitario habilitado.
- Se preste especial atención a la justificación y optimización en el caso de los niños, por tener una mayor sensibilidad a la radiación, así como las mujeres embarazadas para la protección del feto y las mujeres lactantes.

Residuos radiactivos

En algunas de las aplicaciones médicas de las radiaciones se generan materiales residuales, para los que no hay previsto ningún uso posterior (como toallas de papel, algodones y gasas, jeringas usadas y viales con restos), que contienen o están contaminados por cierta cantidad de elementos radiactivos con los que han estado en contacto.

Una correcta gestión de estos residuos radiactivos (clasificación, segregación, almacenamiento y eliminación controlada), debe permitir minimizar los riesgos de contaminación e irradiación para profesionales expuestos y público en general, y reducir el impacto de los mismos sobre el medio ambiente.

Generalmente estos residuos presentan niveles de actividad muy bajos, por lo que muy probablemente podrán ser evacuados como residuos convencionales al quedar por debajo de los valores legalmente establecidos para ello. Aun no cumpliéndose lo anterior de partida, si el periodo de semidesintegración del radionucleido no es muy elevado, pueden almacenarse el tiempo necesario hasta que la actividad haya decaído por debajo de dichos valores regulados, llamados de desclasificación.

Por tanto, la gestión final de los residuos radiactivos se realiza de acuerdo a dos posibles vías, siendo la primera de las citadas la más habitual en los centros sanitarios: vertido controlado como desechos convencionales no radiactivos (eventualmente tras un almacenamiento para el decaimiento necesario) o, si lo anterior no es factible, evacuación a través de entidad autorizada (Enresa, empresa nacional de residuos radiactivos), para su almacenamiento final controlado.

PUNTOS CLAVE

- **En un centro sanitario se utilizan diferentes tipos de radiaciones ionizantes para el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades.**
- **Tanto en radiodiagnóstico, como en medicina nuclear o en radioterapia, se utilizan diferentes técnicas y equipamiento para llevar a cabo el objetivo diagnóstico y el terapéutico.**
- **Todas las exposiciones médicas a las radiaciones ionizantes deben estar justificadas.**

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué tipo de radiación ionizante se utiliza en radiodiagnóstico? ¿Cómo se genera esta radiación? ¿Es radiación natural o artificial?
2. ¿Qué es un radiotrazador? ¿Cómo y en qué aplicación se utiliza?
3. ¿Qué es la radioterapia?
4. ¿Qué tipo de fuentes de radiación se emplean en cada una de las técnicas que has estudiado en el tema?
5. Escribe cuatro condiciones que se deben cumplir a la hora de aplicar la radiación ionizante a un paciente.

Buscar en Internet

Investiga quién fue Röntgen, cuándo, dónde vivió y qué descubrió.

Debate

Organizar un debate sobre las ventajas y posibles riesgos de la aplicación de las radiaciones ionizantes en medicina.

UNIDAD 6. APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN INDUSTRIA E INVESTIGACIÓN

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Nombrará que la capacidad de la radiación de atravesar la materia sirve para numerosas aplicaciones.
- Ejemplificará que las radiaciones ionizantes se aplican en el sector de la industria, en alimentación, en agricultura y en investigación.
- Será capaz de nombrar y describir, al menos, tres aplicaciones de la radiación ionizante en industria y agricultura.
- Explicará la importancia que las radiaciones ionizantes tienen en la investigación.
- Podrá concluir ventajas e inconvenientes del uso de la radiación ionizante.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad pueden consultarse los capítulos 4 (radiactividad y radiaciones ionizantes), 7 (otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes) y 8 (residuos radiactivos: origen y gestión) del suplemento técnico.

Sugerencias didácticas

A pesar de la extensión del tema, en esta unidad no se manejan conceptos excesivamente difíciles. Además, los alumnos/as pueden estar familiarizados con algunas aplicaciones que se describen en el texto (detectores de humo o escáner de rayos X).

UNIDAD 6

FICHA DEL PROFESORADO

En esta unidad se analizan las principales aplicaciones que la radiación ionizante tiene en diversos campos (industria, alimentación, agricultura, investigación). Es importante que los alumnos entiendan que la propiedad de la radiación, determinante para estas aplicaciones, es su capacidad de atravesar la materia. Esta propiedad es, a su vez, un riesgo. Al final del tema se puede proponer un debate sobre las ventajas e inconvenientes del uso de las radiaciones ionizantes.

Preguntas y respuestas

1. ¿Cuál es la propiedad fundamental de la radiación ionizante para que tenga tantas aplicaciones importantes?
   La propiedad fundamental de la radiación ionizante que la hace tan importante es su capacidad para modificar la materia al arrancar electrones de los átomos, es decir, ionizarlos. También, el hecho de que cantidades insignificantes de elementos radiactivos puedan medirse rápidamente y de forma precisa proporcionan información exacta de su distribución espacial y temporal. Esto le permite destruir células dañinas, como en el tratamiento del cáncer, esterilizar equipos médicos o ayudar a obtener imágenes del interior del cuerpo, como en los rayos X.

2. Citar las aplicaciones de la radiación ionizante en la industria y describir una de ellas.
   Control del proceso de fabricación midiendo, por ejemplo, el nivel, espesor o densidad del producto. Otras aplicaciones son: medida del grado de humedad, gammagrafía o radiografía industrial, detectores de humo, esterilización de materiales, modificación de las características de los materiales, eliminación de la electricidad estática, datación, detección de fugas, análisis de la estructura y de la composición de la materia.

3. ¿Cuáles son las aplicaciones de la radiación ionizante en la agricultura?
   Optimizar los recursos hídricos, el control de plagas y la conservación y esterilización de determinados alimentos.

4. La aplicación de la radiación ionizante, ¿tiene algún inconveniente?
   Sí. El daño que la radiación ionizante puede producir en el cuerpo humano de los trabajadores que empleen estas técnicas o del público que pase por ahí si no se emplean las medidas de protección radiológica pertinentes.

Búsqueda en Internet

Buscar información sobre el proceso de irradiación de alimentos: ¿cuándo se comenzó a usar?, ¿qué alimentos se irradian y para qué?, ¿se ven afectados los nutrientes por el proceso de irradiación?, ¿se irradian los alimentos con cualquier dosis?

Debate

Organizar un debate sobre las ventajas e inconvenientes del uso de las radiaciones ionizantes.

UNIDAD 6. APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN INDUSTRIA E INVESTIGACIÓN

Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo de la industria y también de la investigación son muchas y muy variadas. La industria aprovecha la capacidad que las radiaciones tienen para atravesar los objetos y materiales perdiendo su intensidad y el hecho de que cantidades insignificantes de elementos radiactivos puedan medirse rápidamente y de forma precisa proporcionando información exacta de su distribución espacial y temporal.

A continuación, se presentan algunas de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo industrial, agricultura, alimentación e investigación.

Usos en industria

Algunas de las aplicaciones más significativas de las radiaciones ionizantes en la industria son:

- Equipos de control de proceso, para controlar el proceso de fabricación, por ejemplo, midiendo el espesor y la densidad de las hojas de papel, láminas de plástico o planchas de acero, o midiendo el nivel de llenado en el proceso de embotellado o en depósitos que contengan líquidos, figura 1.6.1.



Figura 1.6.1. Equipo de control de procesos para medida de nivel de llenado.



Figura 1.6.2. Equipo de medida de densidad y humedad de suelos.

- Medida del grado de densidad y humedad de suelos, muy útil para medir la humedad en materiales a granel (arena, cemento), para controlar el grado de humedad en el terreno o en los materiales de construcción (figura 1.6.2).

- Radiografía industrial. Usada, por ejemplo, para verificar las uniones de soldadura en tuberías o ver el estado de estructuras (figura 1.6.3.). También se usa en el ámbito del arte para ver diferentes capas de pintura en los lienzos o ver el contenido de vasijas, estructuras de esculturas y demás ensayos no destructivos para las obras.

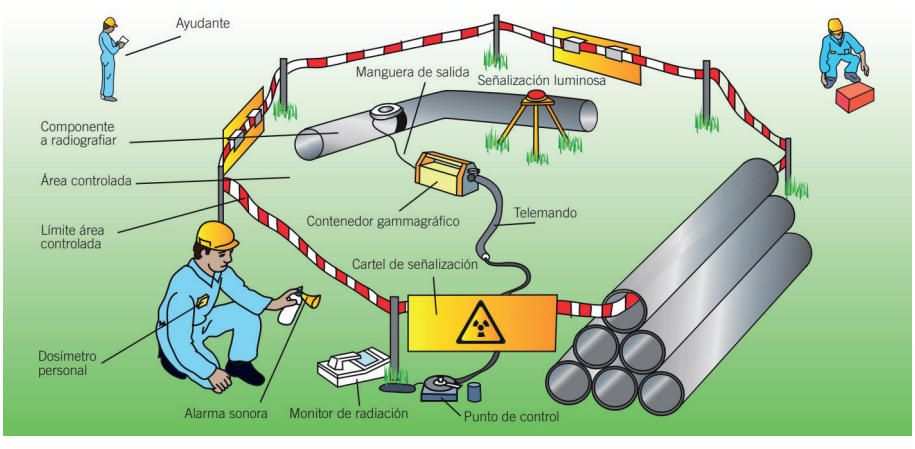


Figura 1.6.3. Proceso de verificación de soldaduras mediante gammagrafía industrial.

Control de seguridad y vigilancia. Todos los detectores de seguridad de aeropuertos, correos, edificios oficiales, etc. utilizan los rayos X para radiografiar bultos y ver su contenido (figura 1.6.4) e incluso equipos para radiografiado de grandes vehículos (figura 1.6.5).



Figura 1.6.4. Equipos de rayos X para inspección de bultos.



Figura 1.6.5. Equipos de rayos X para inspección de vehículos.

- Detectores de humo, instalados dentro de las redes de vigilancia contra incendios. Su diseño incorpora una cámara de ionización, una fuente radiactiva (americio-241, < 37 kBq) y una carcasa envolvente del conjunto (figura

1.6.6). La fuente radiactiva ioniza el aire de la cámara y produce una débil corriente eléctrica. Las partículas de humo que penetran en la celda, captan los electrones y reducen o interrumpen esa corriente de iones, lo que desencadena una señal de alarma. Estos sistemas están en desuso y poco a poco se van sustituyendo por sistemas actuales que no requieran el uso de fuentes de radiación.



Figura 1.6.6. Detector iónico de humo.

- Esterilización de materiales. Técnica que utiliza la radiación ionizante por su acción bactericida. Muy utilizado en la industria farmacéutica y alimentaria. Se aprovecha la alta energía de la radiación para poder eliminar los posibles organismos vivos que haya en el material. Deben utilizarse fuentes de muy alta actividad por lo que su uso está muy controlado.

- Calibración de monitores. Otro uso poco habitual es el de los haces de radiación para calibrar los equipos que miden radiación. Deben usarse fuentes de alta actividad para simular diferentes cantidades de radiación y probar los equipos que se usarán posteriormente en las instalaciones.

- Modificación de las características de materiales. Se utiliza por ejemplo en el proceso de vulcanización del caucho, en la producción de cristales coloreados, o en el tratamiento de ciertos plásticos para hacerlos más duraderos, fuertes y resistentes al fuego.

- Eliminación de la electricidad estática aprovechando la ionización que provocan las radiaciones en los medios que atraviesan. Es muy útil en la industria textil, de plásticos, papel, vidrio, etc.

- Datación. Mediante el análisis de carbono-14 radiactivo podemos determinar con precisión la antigüedad de diversos materiales orgánicos. Esta técnica se utiliza en la investigación histórica, el estudio del clima o la restauración pictórica y escultórica.

- Detección de fugas. Introduciendo en las canalizaciones isótopos radiactivos como trazadores que se adhieren a las sustancias de transporte y que pueden detectarse de manera sencilla.

- Técnicas analíticas. Para determinar la composición o estructura de la materia que se analiza como en el caso de aleaciones metálicas.

Usos en agricultura y alimentación

También son muchas las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en agricultura y en alimentación. Así, por ejemplo, encontramos:

- Optimizar los recursos hídricos. Mediante el uso de sondas de neutrones se puede determinar la humedad de un terreno estableciendo así la cantidad de agua que le falta o le sobra para obtener una cosecha óptima, ahorrando con ello mucha agua.

- Control de plagas mediante la técnica del insecto estéril. En el laboratorio se esterilizan mediante radiaciones ionizantes grandes cantidades de machos que luego se sueltan en el área afectada.

- Alimentación. Técnica que mediante la irradiación con rayos gamma permite la conservación y esterilización de determinados alimentos. En España, solo se permite el tratamiento de hierbas aromáticas, especias y condimentos vegetales (secos). Sin embargo, por el principio de reconocimiento mutuo, es posible encontrar en el mercado español productos procedentes de otros países comunitarios donde estén autorizadas otras categorías de alimentos siempre y cuando vayan convenientemente etiquetados.

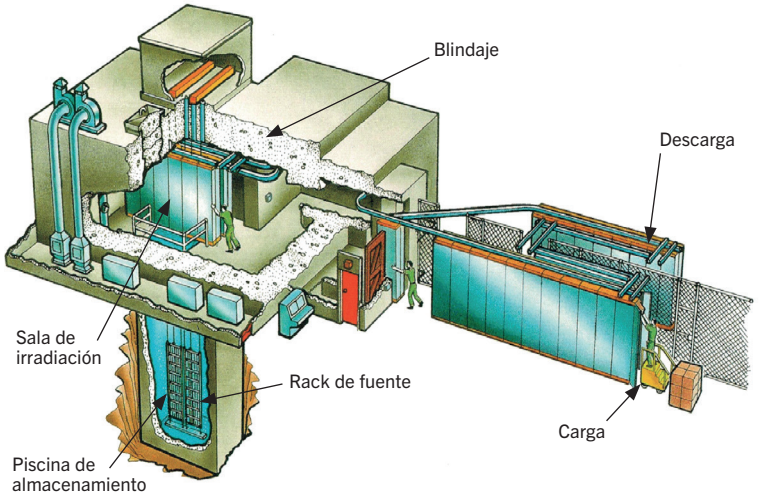


Figura 1.6.7. Instalación para la irradiación de alimentos.

UNIDAD 6

FICHA DEL ALUMNADO

Usos en investigación

El uso de las radiaciones ionizantes ha supuesto un increíble avance en todo tipo de actividades de investigación tales como los estudios de biología celular y molecular, la medicina, la genética y la química de materiales. Gracias a estas radiaciones, los científicos pueden estudiar procesos que antes eran invisibles o demasiado complejos de analizar.

Por ejemplo, en los estudios sobre el cáncer, las radiaciones permiten observar el comportamiento de las células enfermas y cómo responden a distintos tratamientos. También se utilizan para investigar patologías moleculares, es decir, enfermedades que afectan el funcionamiento de las células a nivel molecular, como algunas enfermedades genéticas o neurodegenerativas. Además, han sido clave en la comprensión de la evolución genética, ayudando a rastrear mutaciones a lo largo del tiempo, y en el desarrollo de nuevas técnicas de terapia genética.

- En general la investigación emplea los isótopos radiactivos no encapsulados ensayando en laboratorio. Estos isótopos son átomos que emiten radiación y permiten rastrear el camino de ciertas sustancias dentro de un experimento. Al usar pequeñas cantidades de estas sustancias, se puede estudiar a escala reducida un proceso o fenómeno, y luego aplicar ese conocimiento en contextos más amplios, como en la medicina o la industria.

- También se emplean técnicas analíticas, como la difracción de rayos X, o la espectrometría para investigar la estructura cristalina de distintos compuestos, es decir, cómo se ordenan los átomos dentro de un material. Estas técnicas también ayudan a identificar componentes en muestras biológicas, ambientales o industriales, con gran precisión.

En definitiva, los numerosos usos de la radiación ionizante y de los materiales radiactivos contribuyen a mejorar la calidad de vida de la sociedad. Pero siempre se deben sopesar los beneficios de cada uso con el riesgo que supone la utilización de radiaciones ionizantes para los trabajadores, la población general, el medio ambiente o las futuras generaciones. Por tanto, y al margen de consideraciones políticas o económicas, los beneficios siempre deben superar a los riesgos cuando se trate de utilizar las radiaciones ionizantes.

Gestión de residuos en aplicaciones industriales

En el caso de los equipos destinados a usos industriales, es importante distinguir entre los equipos de rayos X y los equipos con fuentes de radiación.

Los equipos que disponen de tubos de rayos X son más fáciles de gestionar. Una empresa especializada debe romper el tubo de rayos X el cual se trata de un tubo de cristal y facilitar un documento en el que lo certifique. La propia instalación no debe realizar esta acción. El resto del equipo se gestionará de manera convencional, como equipo industrial metálico. Todo este equipo de rayos X no se considera residuo radiactivo.

Por otro lado, la gestión de los equipos con fuente de radiación es más complicada ya que la fuente de radiación siempre estará emitiendo. La prioridad es intentar que la propia empresa suministradora de la fuente, se la quede. Con esta gestión circular se intenta reacondicionar la fuente y seguir dándole uso en otra industria reduciendo así la cantidad de residuos radiactivos. Por ejemplo, los gammágrafos necesitan fuentes de mucha actividad que al poco tiempo se consideran decaídas para su uso, no obstante, para otro tipo de industria como, por ejemplo, el control de llenado de tolvas, esa misma fuente es aún válida. Lo que para un sector es un residuo, para otro es una fuente. En el caso de que el suministrador ya no exista o no se haga cargo de la fuente, deberá gestionarse con la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa).

Gestión de residuos radiactivos en investigación

En los laboratorios de investigación que utilizan radiaciones ionizantes, como los de biología, física o química, se generan residuos radiactivos que deben ser gestionados de forma segura para proteger la salud humana y el medio ambiente.

¿Qué son los residuos radiactivos?

Son materiales que contienen isótopos radiactivos, es decir, átomos inestables que emiten radiación. Estos residuos pueden ser:

- **Sólidos:** como frascos, guantes o filtros contaminados.
- **Líquidos:** como disoluciones o reactivos usados.
- **Mixtos:** combinación de sólidos y líquidos.

UNIDAD 6

FICHA DEL ALUMNADO

¿Cómo se gestionan?

En España, el tratamiento de los residuos radiactivos está regulado por el Plan General de Residuos Radiactivos que aprueba el Gobierno y ejecuta la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), creada en 1984 y cuya misión es la gestión de los residuos radiactivos y el desmantelamiento de instalaciones nucleares.

Los laboratorios deben seguir protocolos estrictos para:

- Clasificar y etiquetar correctamente los residuos.
- Almacenarlos en contenedores adecuados y señalizados.
- Entregarlos a Enresa para su tratamiento final.

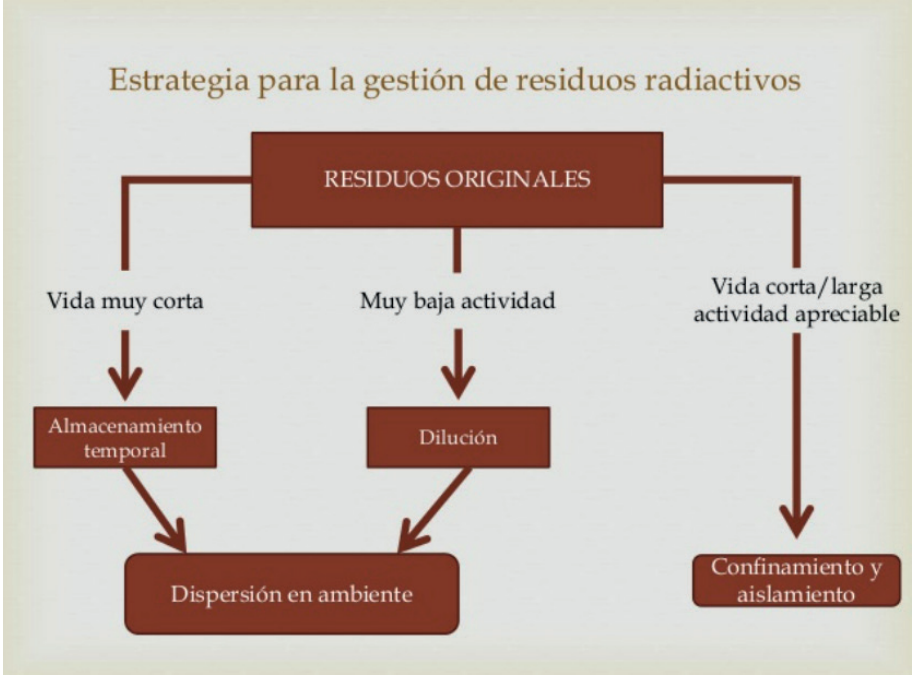


Figura 1.6.8. Estrategias para la gestión de residuos radiactivos.

¿Por qué es importante?

Una gestión adecuada de los residuos radiactivos previene riesgos como la contaminación ambiental o la exposición innecesaria a la radiación. Además, contribuye al desarrollo de una ciencia responsable y sostenible.



Figura 1.6.9. Generación de residuos radiactivos.

Puntos clave

Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo de la industria y también de la investigación son muchas y muy variadas.

Algunas de las aplicaciones más significativas de las radiaciones ionizantes en la industria son para medidas de espesor y densidad, o medida de nivel en los productos fabricados, control de calidad de materiales metálicos y soldaduras mediante radiografía y gammagrafía industrial, medida del grado de humedad en suelos, inspección de bultos mediante el uso de equipos de rayos X en controles de seguridad, detectores de humos en sistemas contra incendios, esterilización de materiales en el campo quirúrgico y alimentario, etc.

En investigación se usan isótopos radiactivos no encapsulados en distintos campos de las ciencias, como la biología o el desarrollo de fármacos. Así como técnicas analíticas para investigar la estructura cristalina de distintos compuestos o para identificar componentes en muestras.

UNIDAD 6

FICHA DEL ALUMNADO

Preguntas y respuestas

1. ¿Cuál es la propiedad fundamental de la radiación ionizante para que tenga tantas aplicaciones importantes?

2. Cita las aplicaciones de la radiación ionizante en la industria y describe una de ellas.

3. ¿Cuáles son las aplicaciones de la radiación ionizante en la agricultura?

4. La aplicación de la radiación ionizante, ¿tiene algún inconveniente?

Búsqueda en Internet

Busca información sobre el proceso de irradiación de alimentos: ¿cuándo se comenzó a usar?, ¿qué alimentos se irradian y para qué?, ¿se ven afectados los nutrientes por el proceso de irradiación?, ¿se irradian los alimentos con cualquier dosis?

Debate

Organizar un debate sobre las ventajas e inconvenientes del uso de las radiaciones ionizantes.

UNIDAD 7. OBTENCIÓN DE ENERGÍA DE ORIGEN NUCLEAR

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Definirá los conceptos de fisión y fusión.
- Describirá el funcionamiento general de una central nuclear y conocerá sus partes fundamentales, asociando estas a la función que realizan.
- Distinguirá los dos tipos de centrales nucleares que operan en nuestro país (central de agua en ebullición y de agua a presión).
- Podrá localizar geográficamente las centrales nucleares españolas.
- Describirá el proceso de fusión que ocurre en las estrellas.
- Nombrará el proyecto ITER.
- Citará la existencia del Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre el átomo, las centrales nucleares y el proyecto ITER, pueden consultarse los capítulos 2 (estructura del átomo) y 6 (ciclo del combustible nuclear y funcionamiento de las centrales nucleares) del suplemento técnico, la página web del ITER y las siguientes publicaciones de la Serie Divulgativa editada por el CSN: *El funcionamiento de las centrales nucleares*, *Utilización de energía nuclear para producir electricidad* y *Desmantelamiento y clausura de centrales nucleares*.

Sugerencias didácticas

Es un tema apropiado para alumnos/as de segundo ciclo de educación secundaria. El texto está dedicado a los procesos nucleares que producen energía. En la primera parte se trata la fisión y se explica el funcionamiento de una central nuclear. Para ello se analizan sus partes y se describe la función que cumplen en el conjunto.

Se puede fotocopiar el texto explicativo y en el esquema se pueden eliminar los nombres de cada parte para que los alumnos/as, al final de la explicación, identifiquen cada parte de la central. En la segunda etapa del tema se explica que, en las estrellas, el proceso que genera energía es la fusión. Es importante que los alumnos/as conozcan el proyecto ITER, que intenta reproducir en la Tierra la reacción que ocurre en las estrellas.

Después los alumnos/as leen el texto, contestan a las preguntas y realizan las actividades propuestas.

Para finalizar, se puede proponer un debate sobre los beneficios e inconvenientes de las centrales nucleares o se puede pedir a los alumnos que busquen información sobre el proyecto ITER y que, igualmente, expresen su opinión sobre si es o no necesaria la enorme inversión económica llevada a cabo para desarrollar dicho proyecto.

Preguntas y respuestas

1. Explicar cómo funciona un reactor nuclear de fisión.
   Un reactor nuclear produce electricidad mediante la reacción en cadena de la fisión de átomos. El núcleo de uranio es bombardeado con neutrones, la división del núcleo libera energía y calor que transforma el agua en vapor de agua, controlado por moderadores; el vapor de agua genera electricidad por intermedio de una turbina y un alternador.

2. ¿Cuántas centrales nucleares operativas hay en España? Clasificarlas por tipo de central.
   Actualmente hay cinco centrales nucleares en operación con un total de siete reactores: Almaraz (dos reactores), Ascó (dos reactores), Cofrentes, Trillo y Vandellós II. La central nuclear de Cofrentes es de tipo BWR y el resto de tipo PWR.

3. ¿Por qué fue el Nautilus el primer submarino que pudo pasar bajo el casquete polar?
   El submarino Nautilus pudo pasar bajo el casquete polar gracias a su propulsión nuclear. Este tipo de combustible ofrecía varias ventajas clave: no

necesitaba oxígeno para la combustión, por lo tanto, pudo mantenerse bajo el agua durante un tiempo muy largo. Además, los submarinos que utilizan combustible nuclear tienen una gran autonomía y no necesitan el continuo reabastecimiento de combustible, pudiendo cubrir largas distancias.

4. Buscar información sobre el proyecto ITER.
   El proyecto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) es una iniciativa internacional destinada a demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear como fuente de energía limpia, segura e inagotable. Su objetivo principal es generar 500 megavatios (MW) de potencia térmica a partir de una entrada de 50 MW, logrando así un rendimiento diez veces superior al de la energía suministrada. Ubicado en Saint-Paul-lez-Durance, en el sur de Francia, ITER es el resultado de la colaboración de 35 países, incluyendo a la Unión Europea, Estados Unidos, China, Rusia, Japón, India y Corea del Sur. Aunque inicialmente se preveía que el reactor comenzará a operar en 2025, diversos desafíos técnicos y logísticos han pospuesto el inicio de las operaciones hasta 2035.

5. Investigar quiénes son los cinco países que pueden tener armamento nuclear y han firmado el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares.
   El tratado permite a cinco países la posesión de armas nucleares: Estados Unidos (firmante en 1968), Reino Unido (1968), Francia (1992), Unión Soviética (1968, sustituida en la actualidad por Rusia) y República Popular de China (1992).

UNIDAD 7

FICHA DEL ALUMNADO

UNIDAD 7. OBTENCIÓN DE ENERGÍA DE ORIGEN NUCLEAR

En esta unidad aprenderás cómo son las centrales nucleares que se basan en la fisión nuclear (división del núcleo) y que existe en construcción un reactor experimental (denominado ITER) de fusión nuclear, basado en la unión de dos núcleos.

La fisión nuclear

El principio de una central nuclear es muy sencillo. Es la tecnología aplicada la que es compleja debido a los fenómenos físicos en juego, las potencias alcanzadas, los requisitos técnicos y las precauciones necesarias para asegurar, en todo momento, la seguridad de los trabajadores, de la población y del medio ambiente.

Una central nuclear no difiere de una central térmica (carbón, fuel o gas) más que en que el calor se origina como resultado de la ruptura de los átomos del combustible al ser bombardeados por neutrones. Este calor se utiliza para producir el vapor que mueve la turbina que a su vez está conectada con el generador de energía eléctrica o alternador. Se transforma así la energía calorífica liberada por el combustible, en energía mecánica que hace mover la turbina, y después en energía eléctrica en el alternador.

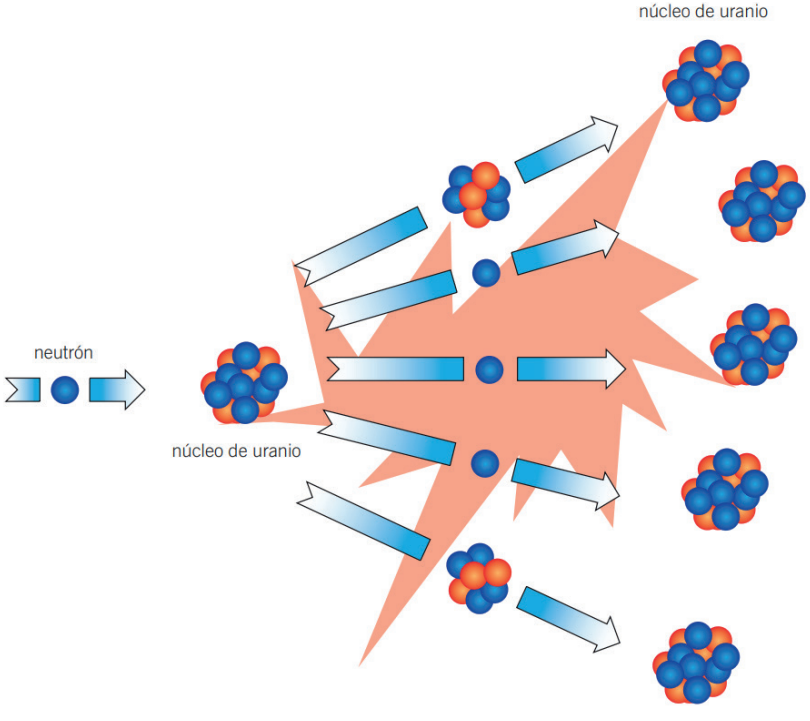


Figura 1.7.1.
Reacción en cadena.

Combustible/reacción nuclear en cadena

El material utilizado como combustible está formado por átomos fisibles (que se pueden dividir), pudiendo ser uranio natural, uranio tratado para que tenga mayor contenido en el isótopo uranio-235 (llamado uranio enriquecido), torio o uranio mezclado con plutonio. El combustible más utilizado es el uranio enriquecido. Cuando un átomo se divide (se fisiona o se escinde) por el impacto de un neutrón se producen, básicamente, dos o más fragmentos radiactivos y sobre todo nuevos neutrones capaces de reproducir este proceso. Este proceso recibe el nombre de reacción nuclear en cadena (figura 1.7.1).

Vasija del reactor / moderador/ barras de control

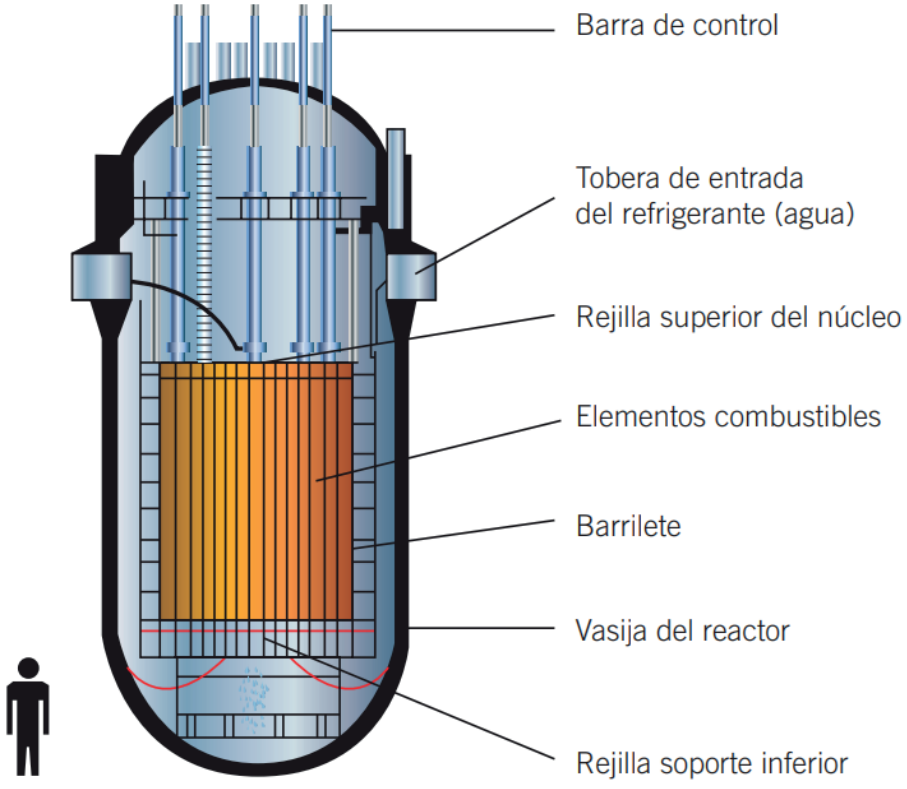


Figura 1.7.2. Esquema de un reactor nuclear PWR.

El reactor nuclear (figura 1.7.2) es la parte más importante de la central nuclear (figura 1.7.3), ya que es donde se produce la energía que luego se transforma en electricidad. Así, como el corazón bombea sangre al resto del cuerpo, el reactor proporciona el calor que pone en marcha todo el sistema de generación eléctrica. El uranio enriquecido se encuentra en forma de pastillas cerámicas que se introducen en el interior de una vaina o envoltura metálica

formando así la varilla de combustible. Las varillas se colocan en un armazón junto con otros elementos auxiliares para formar un elemento de combustible. Estos elementos combustibles son los que se colocan en el interior de la vasija del reactor rodeados de agua. El agua es la encargada de transportar el calor y además hace de moderador: es la sustancia que frena, mediante choques, los neutrones que se producen en la reacción de fisión hasta una velocidad adecuada para que puedan producir una nueva reacción de fisión. La vasija del reactor dispone de barras de control que contienen una sustancia que captura los neutrones de forma tal que la reacción nuclear se puede parar totalmente, si se insertan del todo, o modificar la potencia del reactor variando la posición de dichas barras.

El vapor que alimenta la turbina puede ser producido directamente en el interior de la vasija del reactor (en los reactores de agua en ebullición) o en un cambiador denominado generador de vapor (en los reactores de agua a presión). El vapor debe ser condensado antes de regresar otra vez al reactor y esto se hace en los generadores de vapor.

El presionador, en los reactores de agua a presión, sirve para mantener la presión necesaria en el circuito primario para su correcto funcionamiento.

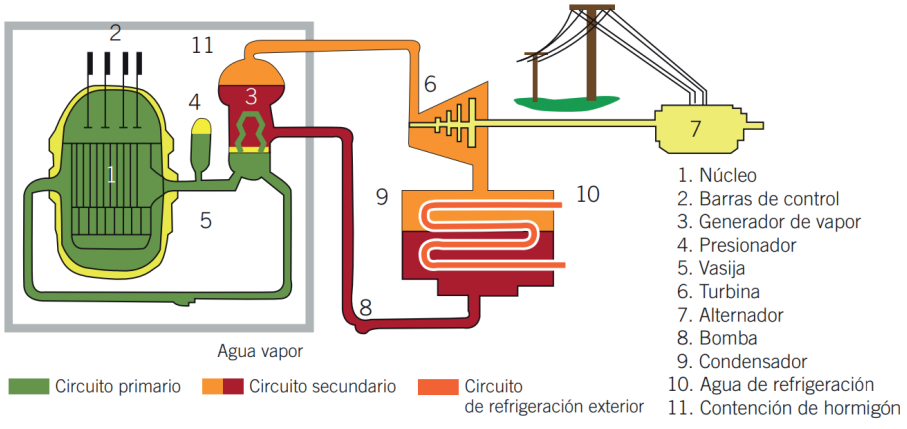


Figura 1.7.3. Esquema de una central nuclear de agua a presión (PWR).

Barreras de seguridad

En el diseño de centrales nucleares se aplica el criterio de defensa en profundidad y se establecen una serie de salvaguardias tecnológicas. Las salvaguardias tecnológicas son los sistemas utilizados para prevenir los accidentes o reducir sus consecuencias. Los productos radiactivos han de atravesar al menos tres

barreras de seguridad antes de poder escapar al medio ambiente. Cada barrera engloba a la anterior.

En la figura 1.7.4 se muestran las siguientes barreras:

- La vaina que envuelve las pastillas de combustible.
- El circuito primario (o barrera de presión).
- La contención.

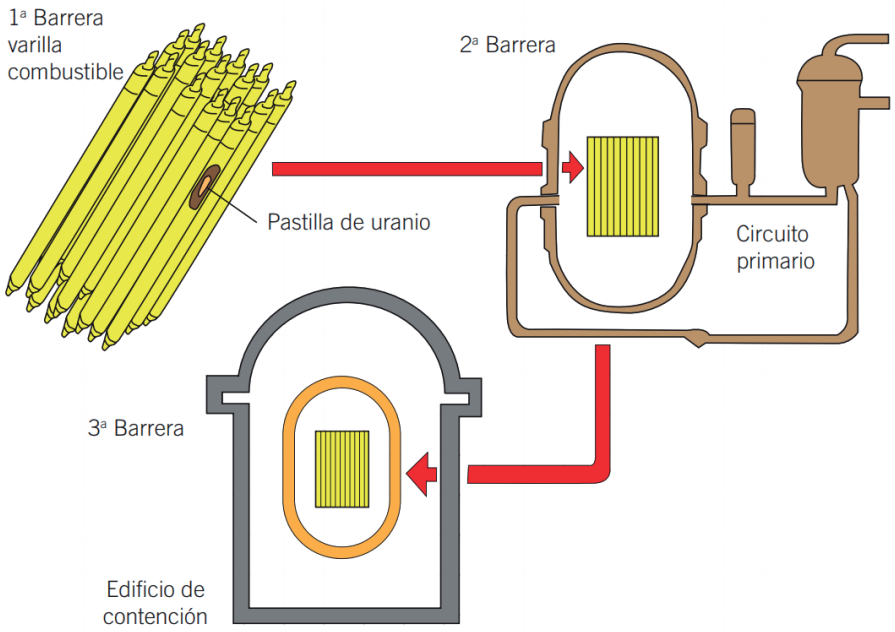


Figura 1.7.4. Barreras de seguridad.

Gestión de residuos radiactivos en las centrales nucleares

En las centrales nucleares españolas se generan distintos tipos de residuos radiactivos que requieren una gestión especializada, coordinada por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa). El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es el organismo regulador encargado de controlar las actividades relacionadas con la gestión de residuos radiactivos en España.

Los residuos radiactivos generados en las centrales nucleares españolas se clasifican principalmente en dos grandes grupos: residuos de baja y media actividad (RBMA) y residuos de alta actividad (RAA). Los RBMA incluyen herramientas, ropa contaminada, resinas y componentes metálicos, representando alrededor del 95 % del volumen total de residuos, pero con baja radiactividad. Se almacenan de forma definitiva en el centro de El Cabril. Los RAA, que

incluyen el combustible nuclear gastado y otros materiales altamente radiactivos, representan solo el 5 % del volumen, pero concentran más del 95 % de la radiactividad total. Estos se almacenan temporalmente en piscinas para su enfriamiento y posteriormente en Almacenes Temporales Individualizados (ATI) ubicados en las propias centrales. La estrategia a seguir a largo plazo con este tipo de residuos, consistirá en construir un Almacén Geológico Profundo (AGP) para garantizar su aislamiento seguro.

Tipos de centrales nucleares operativas en España

Actualmente en nuestro país existen dos tipos de centrales nucleares en operación: las centrales nucleares de agua a presión (PWR) y las de agua en ebullición (BWR). Existía también una central de tecnología diferente, denominada de grafito-gas, que está parada definitivamente y en proceso de desmantelamiento (figura 1.7.5).

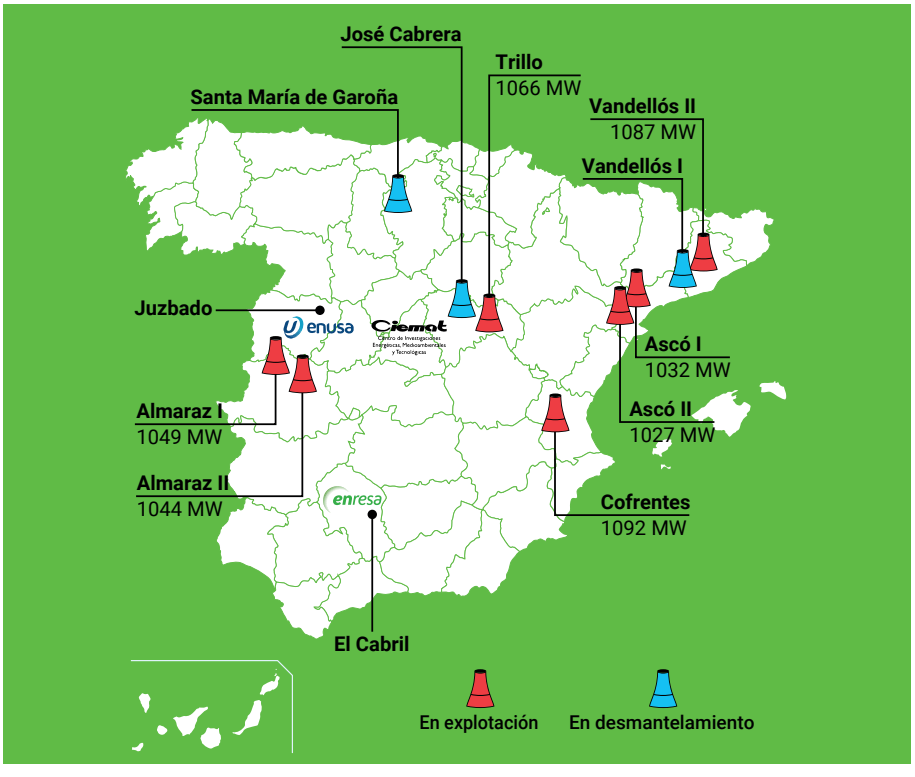


Figura 1.7.5
Centrales nucleares en España.

La fusión nuclear

Un reactor como el de las centrales nucleares, pero en tamaño reducido se utiliza como fuente de energía para algunos submarinos, en vez de usar un combustible convencional disminuyendo notablemente las necesidades de repostaje de estos submarinos nucleares. En 1954, se construyó un submarino americano llamado Nautilus que fue capaz de pasar bajo las macizas capas de hielo del Océano Ártico y por el Polo Norte.

Unión de los núcleos

La fusión nuclear ocurre cuando dos núcleos atómicos muy ligeros se unen y forman un núcleo atómico más pesado, con mayor estabilidad. En este proceso se libera gran cantidad de energía. Esta es la energía que se produce en las estrellas (figura 1.7.6). La energía necesaria para lograr la unión de los núcleos se puede obtener utilizando energía térmica o bien utilizando aceleradores de partículas. Ambos métodos buscan que la velocidad de las partículas aumente para que en el momento de la colisión los núcleos puedan unirse venciendo las fuerzas de repulsión electrostáticas de la "envoltura" de electrones que los recubren en el átomo.

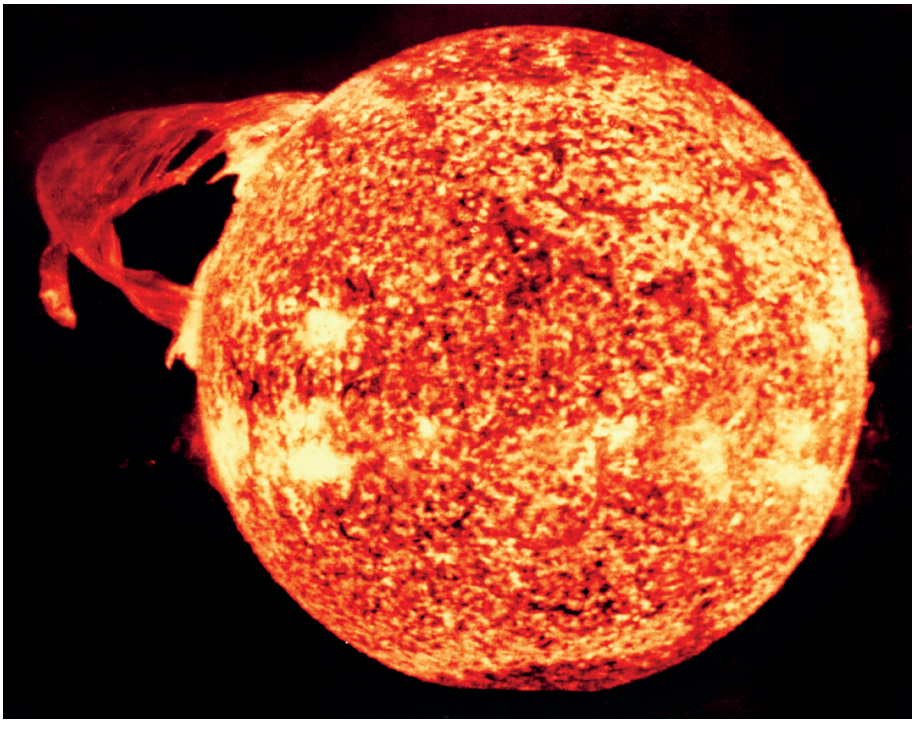


Figura I.7.6 La fusión. La energía de las estrellas.

UNIDAD 7

FICHA DEL ALUMNADO

Plasma

Para obtener núcleos de átomos aislados, es decir, separados de su envoltura de electrones, se utilizan gases sobrecalentados que constituyen un estado de la materia denominado plasma. El plasma es el estado en el que se encuentra la materia en el Sol y las estrellas, pues se tratan de gigantescas estructuras de mezclas de gases calientes atrapadas por su propia fuerza de la gravedad.

Un ejemplo de fusión nuclear se puede representar por el siguiente esquema y relación de equilibrio:

$$2H + 2H \longrightarrow 3He + 1n + \text{Energía}$$

El desarrollo del primer reactor nuclear experimental de fusión conocido como ITER se está llevando a cabo en Cadarache (Francia) y actualmente está en la fase final de construcción (figura I.7.7). El diseño de ITER está basado en el Tokamak, concebido para confinar plasma caliente mediante campos magnéticos con el fin de lograr fusión nuclear controlada, replicando el proceso energético del Sol en la Tierra. El objetivo es que los núcleos de estos isótopos de hidrógeno se fusionen, liberando una gran cantidad de energía. A diferencia de la fisión nuclear, la fusión no produce residuos radiactivos de larga duración.

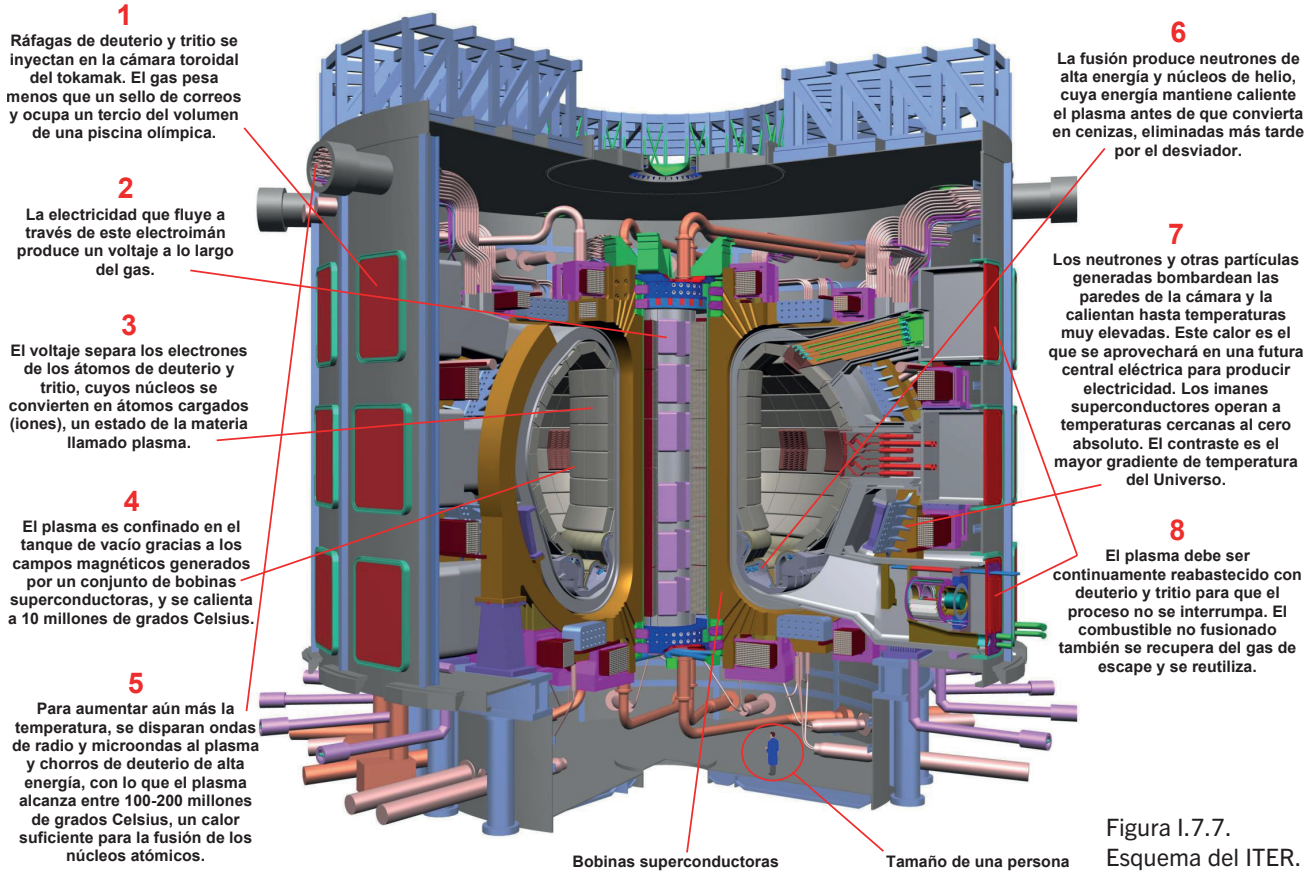


Figura I.7.7.
Esquema del ITER.

Los componentes principales del Tokamak son las bobinas superconductoras que generan el campo magnético utilizado para confinar, conformar y controlar el plasma (nube de partículas cargadas positiva y negativamente a más de cien millones de grados) dentro de una cámara de vacío toroidal en forma de "donuts". Podemos imaginar el desafío tecnológico que supone tener que mantener cien millones de grados en el centro del Tokamak y temperaturas cercanas al cero absoluto en las bobinas superconductoras a escasos dos metros de distancia.

Los principales objetivos de ITER incluyen lograr una producción neta de energía, con una ganancia esperada de 500 megavatios (MW) a partir de una entrada de 50 MW (Q=10), demostrar tecnologías clave como el calentamiento del plasma y el control de estabilidad, investigar la producción de tritio para autosuficiencia de combustible y garantizar operaciones seguras.

Tratado de no proliferación de armas nucleares

Como curiosidad, las bombas nucleares de hidrógeno (conocidas como bombas H) se basan en este tipo de reacciones nucleares de fusión. Al ser una reacción más energética que la de fisión, su poder destructivo es muy superior. Como se puede ver, la tecnología nuclear tiene aplicaciones con fines benéficos, pero también con fines bélicos.

Para evitar la proliferación de las armas nucleares y la tecnología armamentística, fomentar la cooperación en el uso pacífico de la energía nuclear y promover la consecución del desarme nuclear, así como el desarme general y completo, se creó el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares. Abierto a la firma en 1968, este tratado entró en vigor en 1970. En enero de 2000 un total de 187 países se habían sumado a él, incluidos los cinco estados que poseen armas nucleares. A fin de promover la meta de la no proliferación y como medida para fomentar la confianza entre los Estados miembros, este tratado establece un sistema de salvaguardias bajo la responsabilidad del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Las salvaguardias se utilizan para verificar el cumplimiento del tratado mediante inspecciones dirigidas por el OIEA.

PUNTOS CLAVE

Los reactores nucleares tienen otras aplicaciones, aparte de la generación de electricidad para el consumo general. Se emplean, por ejemplo, para propulsar buques (incluidos submarinos). La aplicación de la fusión nuclear para la obtención de electricidad se encuentra todavía en fase de desarrollo (ITER).

UNIDAD 7

FICHA DEL ALUMNADO

Gestión de residuos radiactivos en las centrales nucleares

En las centrales nucleares españolas se generan distintos tipos de residuos radiactivos que requieren una gestión especializada, coordinada por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa). El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es el organismo regulador encargado de controlar las actividades relacionadas con la gestión de residuos radiactivos en España.

Los residuos radiactivos generados en las centrales nucleares españolas se clasifican principalmente en dos grandes grupos: residuos de baja y media actividad (RBMA) y residuos de alta actividad (RAA). Los RBMA incluyen herramientas, ropa contaminada, resinas y componentes metálicos, representando alrededor del 95 % del volumen total de residuos, pero con baja radiactividad. Se almacenan de forma definitiva en el centro de El Cabril. Los RAA, que incluyen el combustible nuclear gastado y otros materiales altamente radiactivos, representan solo el 5 % del volumen, pero concentran más del 95 % de la radiactividad total. Estos se almacenan temporalmente en piscinas para su enfriamiento y posteriormente en Almacenes Temporales Individualizados (ATI) ubicados en las propias centrales. La estrategia a seguir a largo plazo con este tipo de residuos consistirá en construir un Almacén Geológico Profundo (AGP) para garantizar su aislamiento seguro.

Preguntas, tareas y respuestas

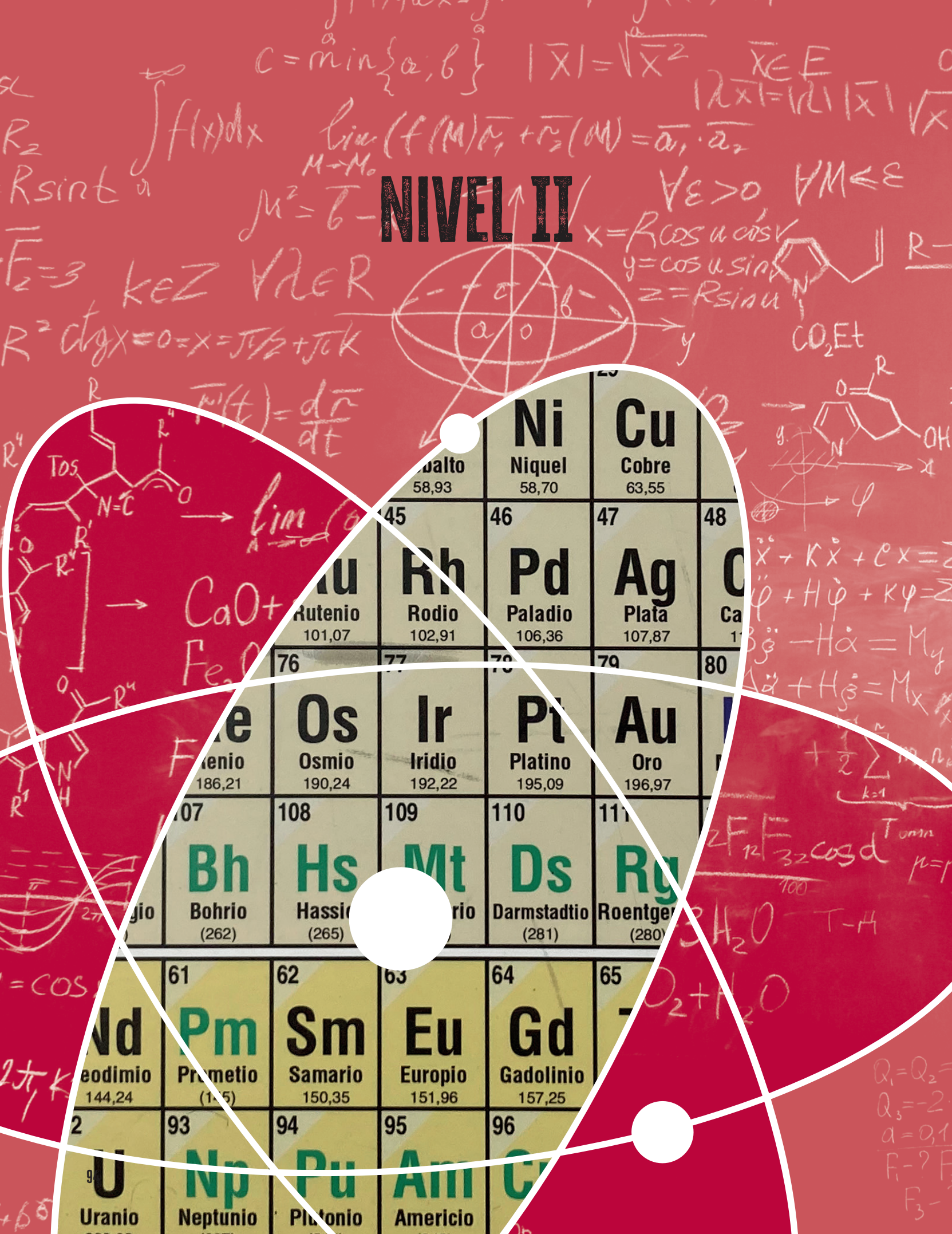
1. Explica cómo funciona un reactor nuclear de fisión.
2. ¿Cuántas centrales nucleares operativas hay en España? Clasifícalas por tipo de central.
3. ¿Por qué fue el Nautilus el primer submarino que pudo pasar bajo el casquete polar?
4. Busca información sobre el proyecto ITER.
5. Investiga quiénes son los cinco países que pueden tener armamento nuclear y han firmado el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares.



UNIDAD 7

FICHA DEL ALUMNADO

NIVEL II


Ni
Niquel
58,70
Cu
Cobre
63,55
45
Rh
Rodio
102,91
46
Pd
Paladio
106,36
47
Ag
Plata
107,87
76
Os
Osmio
190,24
77
Ir
Iridio
192,22
78
Pt
Platino
195,09
79
Au
Oro
196,97
80
108
Hs
109
Mt
110
Ds
Darmstadtio
(281)
61
Pm
62
Sm
Samario
150,35
63
Eu
Europio
151,96
64
Gd
Gadolinio
157,25
93
Np
94
Pu
95
Am
96
Uranio
Neptunio



Consta de siete unidades para el alumnado de 16 a 18 años.

INFORMACIÓN

En este nivel reaparecen diferentes aspectos abordados en el nivel I pero tratados con mayor profundidad. Se incluye una nueva unidad para tratar específicamente el tema de los residuos radiactivos. Igual que en el nivel anterior, en cada unidad se propone un texto que sirve de guion al profesorado para explicar a los alumnos/as diferentes aspectos relacionados con las radiaciones: el origen de la radiación ionizante, los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes, los medios de protección contra este tipo de radiación, las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en distintos campos como en medicina, industria, investigación, construcción, seguridad o para la obtención de energía y el tratamiento de los residuos radiactivos. Al final de cada unidad se incluye un apartado de puntos clave, donde se recogen las ideas principales del tema.

UNIDADES NIVEL II

Unidad 1. Radiación ionizante en la vida diaria

Unidad 2. La radiación ionizante y sus efectos biológicos

Unidad 3. Protección contra la radiación ionizante

Unidad 4. Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes

Unidad 5. Otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes

Unidad 6. Obtención de energía de origen nuclear

Unidad 7. Los residuos radiactivos

EVALUACIÓN

Cada unidad consta de una serie de actividades con las que se puede comprobar el grado de adquisición de los conocimientos.

Al final de este nivel el alumnado debe ser capaz de:

- Identificar las principales fuentes de radiación ionizante de origen natural, la radiación de origen cósmico y radón, destacando el efecto protector de la atmósfera frente a la radiación ionizante de origen cósmico.
- Asociar cada tipo de radiación ionizante con su poder de penetración en la materia que atraviesa y comprender los efectos biológicos que la radiación ionizante produce en los organismos vivos.
- Enunciar los principios básicos de la protección radiológica y las medidas de protección radiológica apropiadas en función del tipo de riesgo radiológico.
- Enumerar aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo médico para diagnóstico y terapia.
- Enumerar algunos ejemplos de aplicación de la radiación ionizante en la industria, alimentación, agricultura, construcción, seguridad e investigación y describir el proceso físico en que se basan.
- Diferenciar los conceptos de fisión y fusión. Conocer que existe un proyecto para la obtención de energía nuclear de fusión llamado “proyecto ITER”.
- Describir el funcionamiento general de una central nuclear, indicar sus partes fundamentales, asociándolas a la función que realizan y conocer los principales tipos de centrales.
- Identificar un residuo radiactivo, conocer su origen y clasificación en función de su radiactividad y el tipo de instalación de almacenamiento más adecuado.
- Explicar que Enresa es la empresa encargada de la gestión de los residuos radiactivos y que el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) se ocupa de controlar la seguridad de esa gestión.

UNIDAD 1. RADIACIÓN IONIZANTE EN LA VIDA DIARIA

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Identificará que la mayor parte de la radiación que recibimos (80 %) es de origen natural.
- Nombrará las principales fuentes naturales de radiación ionizante, clasificándolas en internas o externas.
- Valorará el efecto protector de la atmósfera (radiación cósmica).
- Describirá las formas de disminuir la dosis de radiación ionizante procedente del radón y denominará este elemento como una de las principales fuentes de radiación ionizante natural.
- Describirá el origen y las aplicaciones de la radiación ionizante de origen artificial.
- Distinguirá la contribución de las fuentes naturales y de las fuentes artificiales en el total de la radiación ionizante que recibimos.

Tiempo mínimo propuesto

2 horas.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad pueden consultarse los siguientes capítulos del suplemento técnico: *Espectro de ondas electromagnéticas: radiación ionizante y no ionizante*, *Radiactividad y radiaciones ionizantes* y *Vigilancia radiológica del medio ambiente*.

Sugerencias didácticas

En esta unidad se analiza el origen de la radiación ionizante, clasificándola en natural y artificial. En la primera parte de la unidad se tratan las radiaciones de origen natural y en la segunda parte se nombran algunas aplicaciones de la radiación ionizante (este tema se trata ampliamente en las siguientes unidades de este manual). Es importante que los estudiantes asimilen que la mayor parte de

la radiación ionizante que recibimos es de origen natural (debida fundamentalmente a los elementos radiactivos que hay en la Tierra), y por lo tanto, estamos expuestos a ella siempre. Del mismo modo, es fundamental que conozcan los factores de los que depende la exposición a la radiación natural y las formas de disminuirla.

Se puede introducir el tema pidiendo a los alumnos/as que nombren ejemplos de fuentes naturales y artificiales de radiación, distinguiendo las que son internas y las externas (este concepto es muy intuitivo). Una vez leído el tema, se puede comentar la tabla que aparece al final de la unidad, proponiendo al alumnado que calculen el porcentaje de cada fuente en el total (natural, artificial o natural y artificial juntos). A continuación, se les pide que realicen una tabla, a modo de resumen, donde se incluyan las fuentes naturales y artificiales (con sus porcentajes o dosis) y si son internas o externas. Para terminar, deben responder a las preguntas propuestas.

Preguntas y respuestas

1. ¿A qué radiaciones ionizantes está expuesto el ser humano?
   El ser humano está expuesto principalmente a dos tipos de radiaciones ionizantes: la radiación de tipo natural y la de tipo artificial.

2. ¿A qué llamamos radiaciones ionizantes de origen natural (fondo natural)?
   Las radiaciones ionizantes de origen natural son aquellas que han existido desde siempre y varían según las áreas geográficas. Además, afecta a toda la población con una intensidad relativamente constante a lo largo del tiempo. Algunos ejemplos son la radiación cósmica, la terrestre o el gas radón.

3. ¿Cuál es la dosis promedio al año que recibiría una persona debido a la radiación natural?
   La dosis media anual por persona debido a la radiación anual es 2,4 mSv/año.

4. ¿Qué porcentaje representa la dosis media anual debida a las fuentes de radiación natural?
   Un 80 % por lo menos de la dosis media anual de radiación ionizante recibida por la población mundial proviene de fuentes naturales.

5. ¿Cuál es el límite de dosis establecido para el público, sin tener en cuenta el fondo de radiación natural y las exposiciones médicas?
   El límite establecido para el público (sin tener en cuenta el fondo radiactivo natural y las exposiciones médicas) es de 1mSv por año natural.

6. ¿Qué factores influyen en la tasa de dosis por radiación cósmica?
   La altitud y la latitud.

7. ¿De qué serie radiactiva natural proviene el gas radón-222?
   El gas radón-222 proviene de la serie radiactiva natural del uranio-238.

8. ¿En zonas graníticas hay niveles altos de radón? ¿Qué harías para que no se concentre en el interior de viviendas construidas con esos materiales?
   En zonas graníticas hay niveles altos de radón dado que este tipo de terreno tiene un alto contenido en uranio. Para evitar su concentración en viviendas construidas se debería mejorar la ventilación, instalar sistemas de extracción mecánica, sellar grietas y filtraciones y usar barreras impermeables bajo el suelo.

9. Buscar en Internet el Mapa de Radiación Gamma Natural de España (Marna) y localizar alguna de las áreas con mayor exposición a la radiación ionizante de origen natural.
   Pueden encontrar el mapa en la página web del CSN (www.csn.es). El sur de Galicia o la Sierra de Guadarrama son algunas de las áreas que presentan mayor exposición a la radiación ionizante natural.

UNIDAD 1

FICHA DEL ALUMNADO

UNIDAD 1. RADIACIÓN IONIZANTE EN LA VIDA DIARIA

Más del 80 % de la dosis efectiva anual de la población mundial procede de fuentes naturales de radiación ionizante. Para describir esta exposición a la radiación tenemos que referirnos a pequeñas cantidades de dosis efectiva, para lo que utilizaremos 1/1000 de sievert, que es un milisievert (símbolo mSv), y una millonésima de sievert, el microsievert (símbolo µSv). En esta unidad utilizaremos la palabra "dosis" con el significado de dosis efectiva.

Las radiaciones ionizantes que nos rodean en nuestra vida diaria se pueden clasificar atendiendo a su origen como naturales o artificiales. La exposición de la población a las radiaciones ionizantes de origen natural, que han existido desde siempre, varía según las áreas geográficas. La exposición a la radiación natural o radiación de fondo se puede producir por la incorporación en el organismo de isótopos radiactivos existentes en la corteza terrestre, por inhalación o por ingestión (se trata entonces de una exposición interna) o por las radiaciones procedentes del medio ambiente y de la radiación cósmica (exposición externa).

Una característica distintiva de la radiación natural es que afecta a toda la población con una intensidad relativamente constante a lo largo del tiempo. La dosis efectiva medida per cápita es del orden de 2,4 mSv al año, en la que prácticamente la mitad está producida por el gas radiactivo radón.

Las radiaciones ionizantes de origen artificial (debidas a las aplicaciones industriales, energéticas, médicas, etc.) se comportan de la misma forma que las fuentes naturales, por lo que pueden producir exposiciones internas o externas.

Los límites de dosis recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), incorporados a la normativa europea y a nuestra legislación, son fruto de una serie de estudios en individuos y poblaciones expuestos a diferentes niveles de dosis de radiación y en sus descendientes. El límite establecido para los miembros del público (sin tener en cuenta el fondo radiactivo natural y las exposiciones médicas) es de 1 mSv por año natural, tal y como se puede observar en la figura 2.1.1.

La dosis anual se suele expresar en milisievert por año (mSv/año). La unidad de actividad es el becquerel (símbolo Bq) y utilizaremos Bq por metro cúbico (Bq/m^3) y Bq por kilogramo (Bq/kg) para expresar la concentración de isótopos radiactivos en los materiales.

En la tabla 2.1.1 se puede observar un resumen de las dosis anuales que recibimos de radiación ionizante natural y artificial.

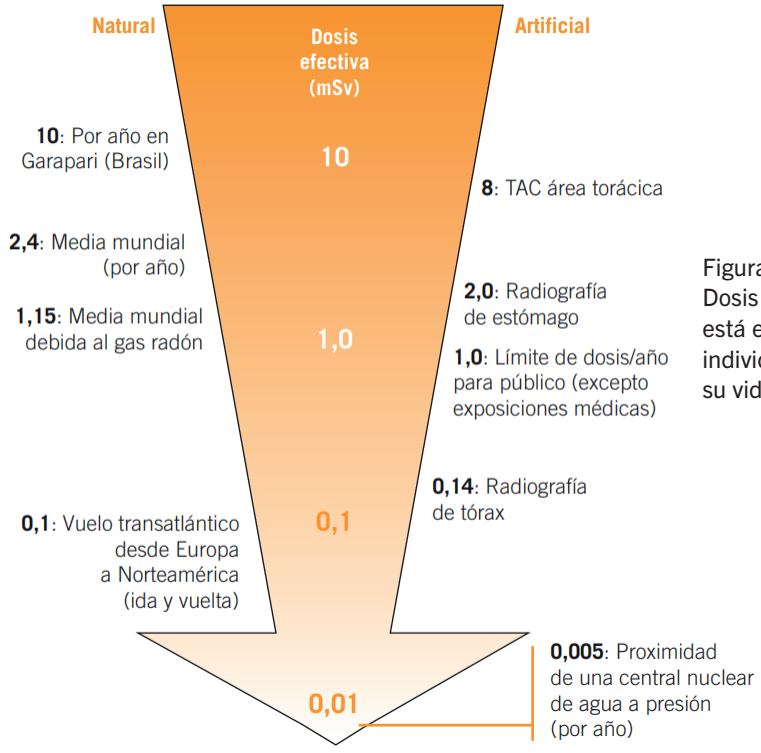


Figura 2.1.1. Dosis a la que está expuesto un individuo durante su vida diaria.

Radiación ionizante natural

La Tierra, desde su creación, ha estado expuesta a la radiación tanto del espacio exterior como a la que proviene de ella misma. Este tipo de radiación, la radiación natural, causa la mayor parte de la exposición de la población. Existen dos tipos de radiación ionizante natural: las fuentes cósmicas y las fuentes terrestres.

Fuentes cósmicas o radiación cósmica

Las fuentes cósmicas son una gran fuente natural de exposición externa a la radiación.

El nivel de exposición a la radiación cósmica aumenta con la altitud, porque perdemos el efecto protector de la atmósfera terrestre, tal y como se puede observar en la figura 2.1.2. Los pasajeros y la tripulación de un avión recibirán una dosis de 0,03 mSv durante un vuelo de 5000 kilómetros y un 10 % de esta dosis, aproximadamente, se debe a los neutrones. La tasa de dosis anual para

las personas que viven por encima del nivel del mar aumenta en 0,03 mSv por cada 1000 metros de altitud.

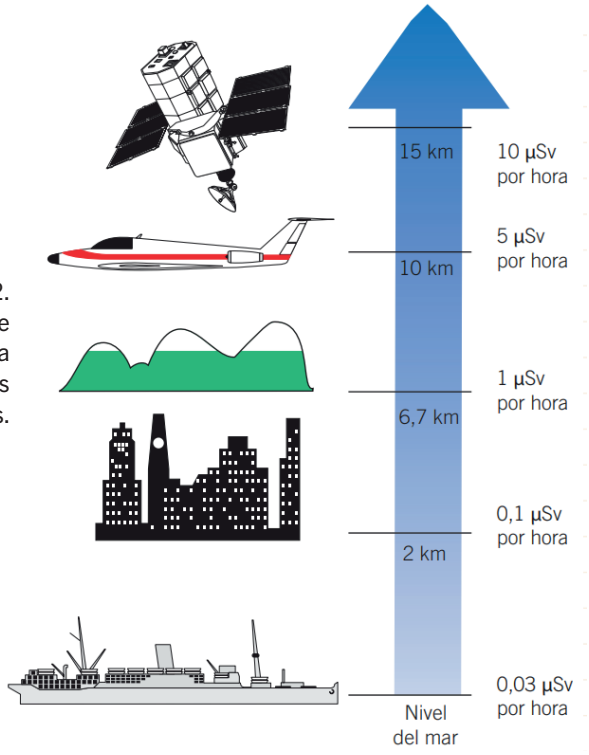


Figura 2.1.2. Valores anuales de radiación cósmica a diferentes altitudes.

La latitud también influye, aunque en menor medida. Por eso, las personas que viven más cerca de los polos reciben más dosis que las que viven cerca del ecuador. Por ejemplo, una persona que viva en Escocia recibirá un 20 % más dosis de radiación cósmica que una persona que viva en Grecia.

Fuentes terrestres o radiación terrestre

Los principales elementos radiactivos presentes en las rocas que constituyen la corteza terrestre son el potasio-40 y las dos series de elementos radiactivos naturales procedentes de la desintegración del uranio-238 y del torio-232. También existe el rubidio-87 y el uranio-235 pero revisten menor importancia.

Los niveles de radiación natural terrestre alrededor del mundo difieren de un lugar a otro, en razón de la variación de la concentración de estos elementos en la corteza terrestre. Así, los valores altos de radiación están ligados en general

a formaciones geológicas que presentan mayor contenido en estos elementos tal y como sucede, por ejemplo, en determinado tipo de granitos y rocas sedimentarias, mientras que los niveles más bajos se asocian a rocas básicas y a formaciones sedimentarias de origen marino.

Por otra parte, el gas radiactivo radón-222 junto con los elementos de su serie radiactiva (descendientes) son los causantes de la mayor parte de la dosis que recibimos de origen natural. La presencia de radón en el aire de las casas tiene diferentes orígenes: el suelo situado bajo la casa, los materiales de construcción o el agua de consumo, aunque este último, únicamente constituye una fuente importante en situaciones especiales. En la figura 2.1.3 se muestran las principales vías de entrada de radón en una vivienda.

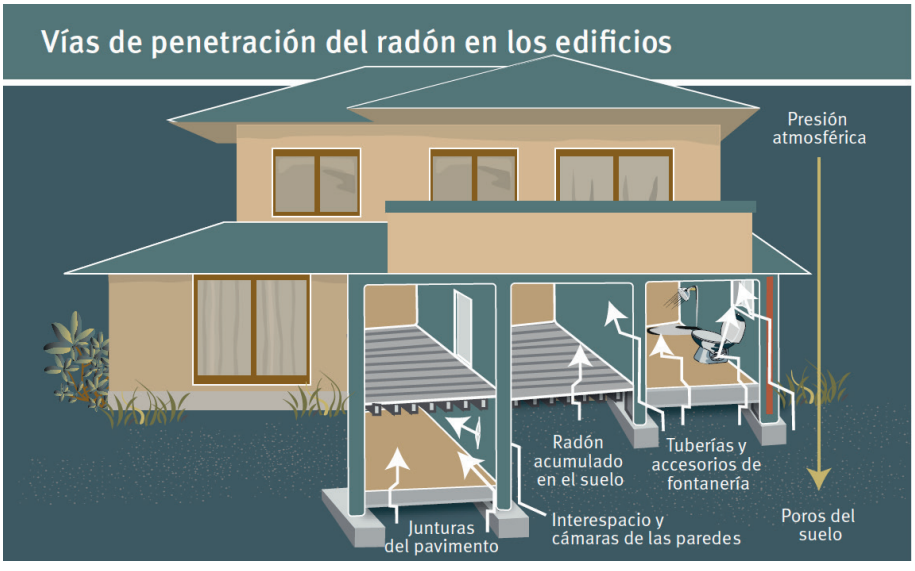


Figura 2.1.3. Principales vías de entrada del radón en una casa.

La concentración de radón en el aire interior es variable, llegándose a medir valores superiores a 5000 Bq/m^3 en algunas zonas de España.

Tal y como se puede observar en la figura 2.1.4, el gas radón-222 se desintegra dando lugar a isótopos radiactivos de vida media corta emisores de radiación alfa, beta, o beta/gamma.

UNIDAD 1

FICHA DEL ALUMNADO

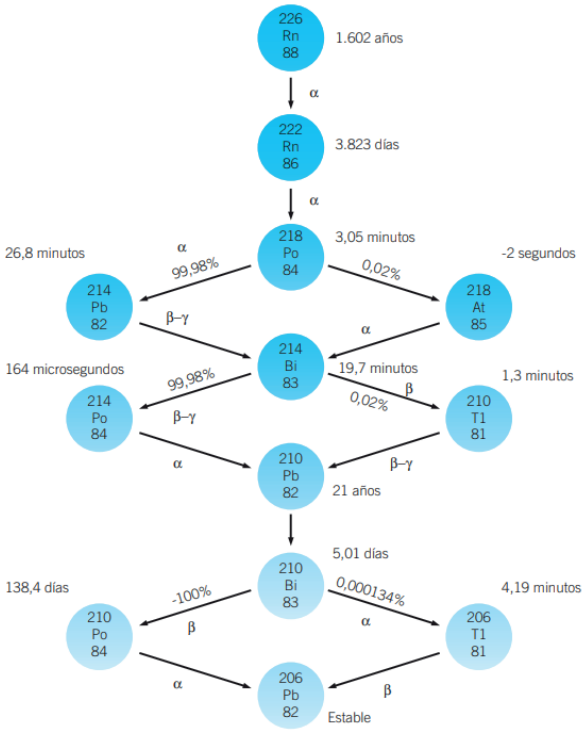


Figura 2.1.4.
Cadena de desintegración del radón-222.

Nuestros pulmones retienen parte de estos isótopos radiactivos (exposición interna) y nosotros recibimos una dosis de radiación a medida que se van desintegrando. Las concentraciones de radón-222 varían durante el día y se encuentran en su nivel más bajo cuando los habitantes abren puertas y ventanas ventilando bien sus casas. En la figura 2.1.5 se pueden observar una opción de mitigación en una vivienda.

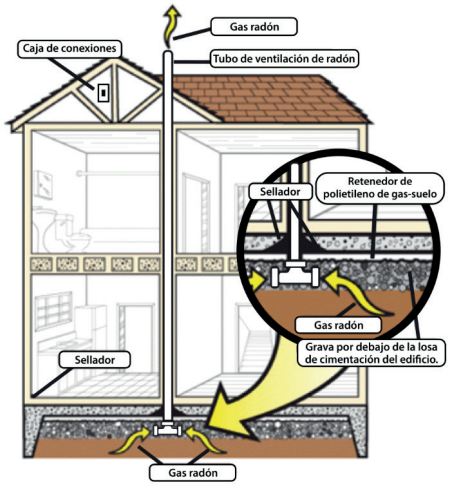


Figura 2.1.5.
Opciones de mitigación del gas radón en una vivienda.

Estas concentraciones de radón-222 también se ven afectadas por factores atmosféricos ya que en periodos de fuertes lluvias el radón se disuelve fácilmente en el agua haciendo que disminuya la cantidad de radón que alcanza la superficie.

Por tanto, en los casos en que las concentraciones no son muy elevadas, podemos disminuir la concentración de radón en nuestras viviendas aumentando el grado de ventilación.

En las zonas donde la concentración de gas radón es elevada se puede disminuir utilizando sistemas de extracción de aire (como se muestra en la figura 2.1.5) o con membranas.

Esta dosis de radiación natural es más elevada en lugares donde el terreno es más rico en uranio. En nuestro país hay zonas, como, por ejemplo, en Pontevedra (Galicia) y en la Sierra de Guadarrama (Madrid), donde las concentraciones de radón son mayores.

Exposición interna a la radiación ionizante natural

La radiación interna se debe a la inhalación de polvo que contenga en suspensión partículas radiactivas, así como a la ingestión de agua y alimentos que hayan incorporado algún elemento radiactivo en su composición.

El potasio natural contiene un 0,01 % del isótopo radiactivo potasio-40 y es un mineral imprescindible para nuestro organismo. Está relacionado con el sistema nervioso y el mantenimiento de la masa muscular. Es el tercer mineral más abundante en el cuerpo humano.

Prácticamente todos los alimentos contienen potasio, por ejemplo, en un litro de leche hay aproximadamente 50 Bq de potasio-40 y en un kilo de cacahuetes unos 200 Bq. La concentración media de potasio-40 en nuestro organismo es de unos 60 Bq/kg y se estima que se recibe una dosis efectiva del orden de 180 µSv/año. Esta es una exposición interna de radiación ionizante natural a la que no podemos escapar, porque el potasio es un elemento esencial y solo absorbemos la cantidad necesaria.

El uranio-238 y su familia, incluido el isótopo radiactivo radio-226, se encuentran en la mayoría de las rocas, suelos y en el agua del mar. Algunas aguas subterráneas contienen radio-226 en concentraciones más o menos elevadas en función de la geología del terreno por la que transcurren.

Radiación ionizante artificial

En las unidades siguientes hablaremos de las radiaciones ionizantes de origen artificial aplicadas a la medicina, industria e investigación. Algunos ejemplos de los usos de la radiación ionizante son los aparatos de rayos X para diagnóstico en medicina, para el control de soldaduras o para el control de seguridad en aeropuertos y edificios públicos, la estimación de la antigüedad de restos orgánicos (midiendo la cantidad de carbono-14), aumento de los periodos de almacenamiento de algunos alimentos que previamente han sido irradiados (cebollas, patatas o azafrán) o la comprobación del estado de soldaduras (mediante gammagrafías) en tuberías, vigas, etc.

Dosis media anual típica que reciben las personas a nivel mundial

La información contenida en este cuadro procede del Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiación Atómica (en su 56º periodo de sesiones) que actualiza los datos recogidos en el informe correspondiente al año 2000 sobre fuentes y efectos de la radiación ionizante.

Este Comité fue creado por la Asamblea General de Naciones Unidas en 1955 y su misión es estimar los niveles y efectos de la exposición a la radiación ionizante e informar sobre ellos. Los informes del Comité se utilizan como base científica para evaluar los riesgos de la radiación y para establecer medidas de protección.

La tabla 2.1.1 recoge los valores de las tasas anuales de dosis efectivas medias a nivel mundial, procedentes de exámenes médicos con fines de diagnóstico, y de otras fuentes de radiación artificial, como son las pruebas nucleares atmosféricas y la producción de energía de origen nuclear.

Tabla 2.1.1. Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante por fuente

Fuente o tipo de exposición	Dosis media anual mundial (mSv/año)	Intervalo típico de las dosis individuales (mSv/año)	Observaciones
Fuentes de exposición naturales			
Inhalación (gas radón)	1,26	0,2 – 10	La dosis es muy superior en algunas viviendas.
Radiación terrestre externa	0,48	0,3 – 1	La dosis es superior en algunos lugares.

Fuente o tipo de exposición	Dosis media anual mundial (mSv/año)	Intervalo típico de las dosis individuales (mSv/año)	Observaciones
Ingestión	0,29	0,2 – 1	
Radiación cósmica	0,39	0,3 – 1	La dosis aumenta con la altitud.
Total natural	**2,4**	**1 – 13**	**Grupos de población importantes reciben entre 10 y 20 mSv.**
Fuentes de exposición artificiales			
Diagnóstico médico (excluida la radioterapia)	0,6	0 – varias decenas	La media correspondiente a distintos niveles de atención médica oscila entre 0,03 y 2,0 mSv. La media en algunos países es superior a la de la exposición a fuentes naturales. La dosis individual depende del tipo de examen aplicado.
Ensayos nucleares en la atmosfera	0,05	Pueden producirse algunas dosis más altas en las inmediaciones de los polígonos de ensayo.	La media ha disminuido después del valor máximo de 0,11 mSv registrado en 1963.
Exposición profesional	0,05	0 – 20	La dosis media de todos los trabajadores es de 0,7 mSv. Casi siempre la dosis media y los niveles más altos de exposición se deben a la radiación natural (concretamente el radón en las minas).

UNIDAD 1

FICHA DEL ALUMNADO

Fuente o tipo de exposición	Dosis media anual mundial (mSv/año)	Intervalo típico de las dosis individuales (mSv/año)	Observaciones
Accidente de Chernóbil	0,02	En 1986, la dosis media recibida por más de 300 000 trabajadores de recuperación llegó a casi 150 mSv y otras más de 350 000 personas recibieron dosis superiores a 10 mSv.	La media en el hemisferio septentrional ha disminuido de un valor máximo de 0,04 mSv registrado en 1986. La dosis tiroidea fue muy superior.
Ciclo de combustible nuclear (exposición de la población)	0,002	La dosis llega hasta 0,02 mSv en grupos críticos a 1 km de distancia de algunos emplazamientos de reactores nucleares.	
Total artificial	**0,6**	**Desde básicamente cero a varias decenas.**	**Las dosis individuales dependen fundamentalmente del tratamiento médico, la exposición profesional y la proximidad al polígono de ensayo o al lugar del accidente.**

PUNTOS CLAVE

- **Un 80 %, por lo menos, de la dosis media anual de radiación ionizante recibida por la población mundial proviene de fuentes naturales.**
- **Las principales fuentes naturales son el radón y sus descendientes de la cadena de desintegración, los elementos radiactivos existentes en nuestros cuerpos, los elementos radiactivos que ingerimos a través del agua y los alimentos, la radiación gamma procedente de los materiales de construcción de los edificios y la radiación gamma de los isótopos de la tierra, y la radiación cósmica del Sol y del espacio exterior.**
- **La radiación ionizante artificial incluye la radiación recibida por el diagnóstico de enfermedades o lesiones y por el tratamiento de estas. Una dosis de radiación muy pequeña es la debida a las pruebas nucleares, a las descargas procedentes de las instalaciones nucleares, a la exposición en el trabajo y a otras fuentes.**

Preguntas, tareas y respuestas

1. ¿A qué radiaciones ionizantes está expuesto el ser humano?
2. ¿A qué llamamos radiaciones ionizantes de origen natural (fondo natural).
3. ¿Cuál es la dosis promedio al año que recibiría una persona debido a la radiación natural?
4. ¿Qué porcentaje representa la dosis media anual debida a las fuentes de radiación natural?
5. ¿Cuál es el límite de dosis establecido para los miembros del público, sin tener en cuenta el fondo de radiación natural y las exposiciones médicas?
6. ¿Qué factores influyen en la tasa de dosis por radiación cósmica?
7. ¿De qué serie radiactiva natural proviene el gas radón-222?
8. ¿En zonas graníticas hay niveles altos de radón? ¿Qué harías para que no se concentre en el interior de viviendas construidas con esos materiales?
9. Buscar en Internet el Mapa de Radiación Gamma Natural de España (Marna) y localizar alguna de las áreas con mayor exposición a la radiación ionizante de origen natural.

UNIDAD 2. LA RADIACIÓN IONIZANTE Y SUS EFECTOS BIOLÓGICOS

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Clasificará cada tipo de radiación ionizante junto con su poder de penetración.
- Describirá los efectos que la radiación ionizante produce en el átomo y las moléculas.
- Identificará los efectos biológicos que la radiación ionizante produce en los organismos vivos.
- Distinguirá los efectos tisulares y estocásticos de la radiación ionizante.
- Relacionará los efectos biológicos que la radiación ionizante puede producir en una mujer embarazada.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad, puede consultarse el capítulo 5 del suplemento técnico: *Efectos biológicos de la radiación ionizante y aspectos legales.*

Sugerencias didácticas

En esta unidad se manejan conceptos químicos y de biología. Se inicia el tema explicando que el efecto que la radiación ionizante produce es la ionización de los átomos. Se repasan los distintos tipos de radiaciones ionizantes, su poder de penetración y las barreras adecuadas para frenarlos o atenuarlos.

La segunda parte del tema trata de los efectos que la radiación produce en el cuerpo humano. Hablamos, entonces, de efectos biológicos. Dependiendo de cómo se manifiesten, los efectos biológicos pueden ser somáticos o hereditarios. Y según el mecanismo y tipo de daño que producen, pueden ser deterministas o estocásticos. Para terminar el tema se recogen los efectos biológicos que la radiación ionizante produce en un caso particular, como es una mujer embarazada.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué es la ionización?
   Es el fenómeno por el cual una partícula o fotón de suficiente energía inciden sobre un átomo y le comunican parte de esta energía con el resultado de expulsar un electrón de su corteza. Así queda alterada su estructura y el átomo queda cargado positivamente.

2. Escribe los tipos de radiaciones ionizantes que existen.
   Partículas alfa, partículas beta, rayos gamma, rayos X y neutrones.

3. ¿Qué barreras utilizarías para detener cada una de las radiaciones ionizantes?
   Para detener la radiación alfa es suficiente una lámina de papel. La radiación beta se detiene con planchas de aluminio o metacrilato. Los rayos X y gamma se atenúan con planchas de plomo o muros de hormigón. Para blindar frente a los neutrones es necesario combinar distintos materiales.

4. ¿Cuándo es peligrosa la radiación alfa?
   Cuando penetra en el interior del organismo por ingestión, inhalación o a través de heridas, dado que deposita casi toda su energía en un espacio muy corto.

5. Completa la siguiente tabla:

Radiación	Poder de penetración / material	Penetración en el cuerpo humano
α (alfa)	5 cm en aire	Se frena en las capas exteriores de la piel
β (beta)	1 cm en aluminio	Penetra 1 o 2 cm
γ (gamma)	Varios cm en plomo o varios metros en hormigón	Puede atravesarlo
rayos X	Varios cm en plomo o varios metros en hormigón	Puede atravesarlo

6. ¿Qué consecuencia biológica tiene la ionización cuando se produce en una célula viva?
   Puede producir roturas en los enlaces químicos de las moléculas que forman las células, directamente en las que forman estructuras sensibles como el ADN o en las moléculas de agua, con la posterior formación de radicales libres muy reactivos. La consecuencia puede ser la muerte celular o los cambios o mutaciones en células que después se transmitan cuando se reproduzcan.

7. ¿Qué son los radicales libres y por qué se originan?
   Son grupos (OH-) originados tras la radiólisis o ruptura de los enlaces químicos de la molécula de agua por la radiación ionizante.

8. ¿Qué efecto pueden tener estos radicales libres?
   Son moléculas muy reactivas químicamente que pueden combinarse entre sí para formar agua oxigenada, compuesto químico altamente oxidante que puede atacar y romper los enlaces químicos en moléculas complejas.

9. ¿Qué es el efecto hereditario? ¿Por qué se origina?
   Es el efecto que se puede producir en la descendencia de un individuo que ha sido irradiado. Se debe a que la lesión ocasionada por la radiación no se ha reparado correctamente, dando lugar a una mutación en una célula que interviene en el proceso de reproducción (célula germinal).

10. ¿Qué es un efecto determinista? Escribe tres efectos deterministas de la radiación ionizante en el feto?
    Es un efecto que se produce como consecuencia de la muerte de una cantidad de células en un órgano o tejido que impide su función normal, y se da cuando la dosis supera un cierto valor umbral.
    Efectos deterministas en el feto son el aborto, las malformaciones congénitas y el retraso mental.

11. ¿Qué es un efecto estocástico? Cita un ejemplo?
    Es un efecto que se produce cuando la radiación causa lesiones en la célula que no se reparan correctamente, dando lugar a un cambio o mutación no mortal. Son de naturaleza probabilista y esta probabilidad crece con la dosis, pero su gravedad no depende de la dosis que lo origina.
    Un ejemplo es la inducción de cáncer.

UNIDAD 2. LA RADIACIÓN IONIZANTE Y SUS EFECTOS BIOLÓGICOS

La radiación ionizante puede afectar al cuerpo humano. Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de la interacción de la radiación con las células vivas.

Ionización

Cuando una partícula o fotón choca con otro átomo, lo más probable es que interaccione con la corteza exterior donde orbitan los electrones. Si como resultado de esta interacción se expulsa un electrón, el átomo perderá una carga negativa y pasará a quedar cargado positivamente. El átomo cargado se llama ión, y se dice que el átomo se ha ionizado. El hueco que queda en su órbita externa le hace químicamente reactivo. Si la reacción química tiene lugar en una célula viva, es probable que dañe a la célula y por ello cause efectos biológicos no deseables. Esta capacidad para causar ionización y los efectos biológicos que produce es la razón por la que deben adoptarse precauciones cuando se utiliza cualquier tipo de radiación ionizante.

Sabemos que la radiación ionizante es penetrante y, en algunos casos, puede pasar a través de objetos sólidos como el metal. A continuación, se dan las distancias típicas de penetración de los distintos tipos de radiación, recordando cuáles son las características que las diferencian, en diversos materiales:

- Partícula alfa: hasta cinco centímetros de aire. Al tener carga y una masa considerable, sufren muchas interacciones en el material, produciendo una ionización muy intensa en su trayectoria.

- Partícula beta: son electrones, por tanto, también con carga y cierta masa (aunque mucho menor que las alfa), interaccionan menos y penetran hasta un centímetro en aluminio.

- Radiación gamma: podemos considerarla como ondas electromagnéticas o fotones, por tanto sin carga ni masa, sufren menos interacciones aún y llegan a penetrar (más cuanto mayor es su energía) hasta varios metros de hormigón, o varios centímetros de plomo.

- Radiación X: semejante en su naturaleza (ondas o fotones sin carga ni masa) a la radiación gamma que tenga energía del mismo orden de magnitud.

- Neutrones: son partículas neutras (es decir, sin carga eléctrica), que interaccionan con la materia mediante reacciones con los núcleos, que pueden dar lugar, a su vez, a partículas cargadas y fotones, de manera que finalmente pueden acabar también originando ionizaciones.

Para detener la radiación alfa es suficiente una lámina de papel. Cuando el isótopo emisor de radiación alfa se encuentra en el exterior del cuerpo humano la radiación se frena en las capas exteriores de la piel y no es peligrosa, pero se convierte en peligrosa cuando penetra en el interior del organismo por ingestión, inhalación o a través de heridas, dado que deposita casi toda su energía en un espacio muy corto. Ello provoca graves daños, si se trata de radiación alfa de alta energía.

La radiación beta es algo más penetrante que la radiación alfa y es capaz de penetrar uno o dos centímetros en los tejidos vivos. Se frena con una lámina de aluminio y como blindaje para este tipo de radiación se puede emplear tanto el aluminio como otros materiales ligeros, compuestos de elementos de bajo número atómico, por ejemplo planchas de metacrilato.

La radiación X y gamma son radiaciones que se pueden considerar ondas electromagnéticas. La radiación gamma procede del núcleo del átomo mientras que la radiación X procede de la zona de la corteza del átomo radiactivo. A igualdad de energía son igual de penetrantes; ambas pueden atravesar el cuerpo humano aunque depositan a su paso menos energía que la radiación alfa o la radiación beta. Para frenar o atenuar este tipo de radiación se utilizan planchas de metales pesados, de alto número atómico, como por ejemplo el plomo, o muros de hormigón.

Los neutrones tienen interacciones muy variables, dependiendo de su energía, pero pueden llegar a tener gran penetración. Su blindaje se compone de distintos materiales, con el objetivo de reducir su energía primero y absorberlos después.

¿Qué efectos produce la radiación ionizante?

La radiación ionizante, como consecuencia de la transferencia de energía y producción de ionizaciones en los átomos y moléculas constituyentes de las células, puede causar en el medio celular daño de dos maneras distintas, lo que se conoce como efectos directos o indirectos.

El efecto directo se da cuando la ionización da lugar a roturas en la molécula de ácido desoxirribonucléico (ADN) que forma los cromosomas, que se encuentran en el núcleo de la célula y donde está codificada toda la información genética, y que por tanto pueden afectar a la correcta reproducción celular, como se ilustra en la figura 2.2.1.

El efecto indirecto consiste en la radiólisis o rotura de los enlaces químicos de las moléculas, con la posibilidad de que se formen otras moléculas distintas de las originales. Si nos fijamos en que el elemento más abundante en el medio vivo es el agua, puede producirse la ionización y también el proceso de radiólisis de gran número de moléculas de agua. Este último da lugar a la aparición de radicales libres (grupos OH), que por tener un electrón desapareado son moléculas altamente reactivas.

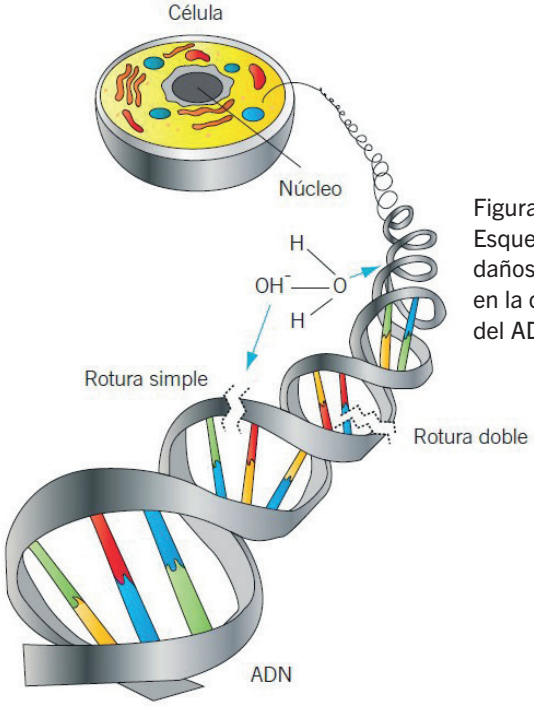


Figura 2.2.1. Esquema de los daños producidos en la cadena del ADN.

A su vez, estos radicales libres pueden, por ejemplo, combinarse entre sí para formar agua oxigenada, compuesto químico altamente oxidante que puede atacar y romper los enlaces químicos en moléculas complejas, como las que forman los cromosomas, dando lugar a la aparición de efectos biológicos.

Las roturas en las cadenas de ADN pueden repararse perfectamente por los mecanismos enzimáticos de la célula, en cuyo caso la supervivencia celular será normal, o si no se produce la reparación la célula morirá. También puede darse una situación intermedia, en la que las lesiones no se reparan correctamente, dando lugar a un cambio o mutación no mortal. Esta mutación puede ser benigna y sin efecto grave a largo plazo, pero también puede dar lugar a patologías cancerosas o genéticas. Por tanto, en función del mecanismo por el cual la radiación produce un daño en la salud, los efectos se denominan bien tisulares o deterministas, bien estocástico.

- Los efectos tisulares (es decir, en tejido) o deterministas, se deben a la muerte de las células. Si la dosis es lo suficientemente elevada, la pérdida por muerte celular puede ser tan importante que el tejido u órgano quede degradado funcionalmente. Como consecuencia de ello, por debajo de un umbral determinado (nivel de dosis), estos efectos no se producen, pero por encima de un determinado nivel de dosis (el umbral para efectos clínicos) el efecto se producirá con seguridad. Además, su gravedad aumenta con la dosis recibida, al estar cada vez más comprometida la función del tejido u órgano. Los umbrales asociados a estos efectos están frecuentemente en valores de dosis de unos pocos grays (Gy)[1].

- Los efectos llamados estocásticos son la inducción de cáncer y los efectos hereditarios. Estos son de naturaleza probabilística (pueden o no producirse) y la probabilidad de que ocurran aumenta con la dosis recibida. En caso de producirse, su gravedad es independiente de dicha dosis, y además el efecto puede aparecer tras un largo periodo de latencia desde la irradiación, incluso de varios años.

  Para este tipo de efectos, a falta de una evidencia científica clara, se ha adoptado una actitud conservadora de tal forma que en el campo de la protección radiológica se supone cierta la hipótesis de que se pueden producir a cualquier nivel de dosis y no existe dosis umbral.

  En cuanto a la forma de manifestarse el efecto, esta puede ser bien en el propio individuo, denominándose efecto somático o bien en sus descendientes, denominándose entonces efecto hereditario, cuando se ha producido en células germinales.

¿Qué efectos biológicos producen las radiaciones ionizantes en el embrión o feto?

En una mujer embarazada que ha sufrido una irradiación los efectos que se pueden producir en el embrión o feto, pueden ser igualmente de naturaleza determinista o de naturaleza estocástica. Son efectos deterministas el aborto, las malformaciones congénitas y el retraso mental. La inducción de cáncer es un efecto estocástico.

El tipo de efectos que la radiación origina sobre el embrión y el feto dependen del momento en que se produzca la exposición respecto al tiempo de gestación, de acuerdo a las distintas fases de desarrollo de órganos y tejidos.

1. El Gray (Gy) es la unidad del sistema internacional en que se mide la magnitud "dosis absorbida", que es la energía absorbida por unidad de masa de un material ($J \cdot Kg^{-1}$). Cuando el material al que nos referimos corresponde a la materia viva y se tienen en cuenta los posibles efectos biológicos producidos, la unidad que expresa la dosis absorbida pasa a llamarse Sievert (Sv). Para las radiaciones electromagnéticas (rayos X y gamma) y para electrones se cumple la equivalencia 1 Gy = 1 Sv, pero en otros tipos de radiación se ha de emplear un factor corrector de forma que dejan de ser numéricamente equivalentes.

Se ha demostrado que los efectos tisulares deterministas (aborto, malformaciones congénitas o retraso mental) no se producen si el embrión o el feto recibe dosis por debajo de 100 mSv. Hay que tener en cuenta que estos efectos también pueden producirse por otras causas no relacionadas con la radiación como la edad de la madre, su estado nutricional, consumo de medicamentos, alcohol o tabaco, antecedentes hereditarios, infecciones durante el embarazo, características del embarazo, parto, etc.

Por otro lado, la inducción de cáncer, al ser un efecto estocástico, se supone que puede producirse a cualquier nivel de dosis, pero debemos considerar que la radiación es únicamente uno de los muchos agentes que potencialmente pueden causar cáncer.

Es decir, el riesgo cero no existe, tanto si hay irradiación como si no. Hasta dosis de 100 mGy no existe un aumento de la probabilidad de incidencia de malformaciones en el recién nacido. La probabilidad de incidencia de cáncer no aumenta para dosis al feto de 1 mGy, y para 100 mGy solo aumenta un 0,6 %.

Como muestra la imagen de la figura 2.2.2, constituye una norma obligatoria según la legislación, adoptar procedimientos suficientes de advertencia, mediante carteles y preguntas a la paciente, para evitar la irradiación innecesaria del feto en caso de qué se prescriba una prueba o tratamiento con radiaciones a una embarazada.



Figura 2.2.2.
Cartel típico de advertencia en una sala de espera de un centro sanitario dedicado al diagnóstico con radiaciones.

UNIDAD 2

FICHA DEL ALUMNADO

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son consecuencia de la interacción de la radiación con las células vivas, dando lugar a la aparición de radicales libres que son moléculas altamente reactivas.

La radiación ionizante tiene diferente poder de penetración en función del tipo de radiación (alfa, beta, rayos X o gamma, neutrones).

Cuando una radiación incide sobre una célula, se producen ionizaciones que pueden afectar de forma directa o indirecta a la molécula de ADN. El efecto puede manifestarse bien en el propio individuo, denominándose efecto somático o bien en sus descendientes, denominándose entonces efecto hereditario- En función de la forma en que la radiación produce un daño en la salud del individuo, los efectos se denominan estocásticos o probabilísticos en un caso y efectos tisulares o deterministas en otro.

Preguntas y tareas

1. ¿Qué es la ionización?
2. Escribir los tipos de radiaciones ionizantes que existen.
3. ¿Qué barreras utilizarías para detener cada una de las radiaciones ionizantes?
4. ¿Cuándo es peligrosa la radiación alfa?
5. Completar la siguiente tabla.
6. ¿Qué consecuencia biológica tiene la ionización cuando se produce en una célula viva?
7. ¿Qué son los radicales libres y por qué se originan?
8. ¿Qué efecto pueden tener estos radicales libres?
9. ¿Qué es el efecto hereditario? ¿Por qué se origina?
10. ¿Qué es un efecto determinista? Escribir tres efectos deterministas de la radiación ionizante en el feto.
11. ¿Qué es un efecto estocástico? Citar un ejemplo.

UNIDAD 3. PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN IONIZANTE

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Inferirá la necesidad de asegurar la protección radiológica en aquellas actividades que supongan la presencia de radiaciones ionizantes.
- Identificará los principios básicos de la protección radiológica.
- Asociará las diferentes medidas de protección radiológica según el tipo de riesgo.

Tiempo mínimo propuesto

2 horas.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre protección radiológica, pueden consultarse los siguientes capítulos del suplemento técnico: Radiactividad y radiaciones ionizantes, Efectos biológicos de la radiación: aspectos legales y El Consejo de Seguridad Nuclear.

Sugerencias didácticas

En esta unidad se manejan muchos conceptos nuevos para los alumnos/as y que, además, son complicados. Se puede comentar la tabla de los límites de dosis legalmente establecidos, haciendo hincapié en que para los casos especiales (mujeres embarazadas y estudiantes entre 16 y 18 años), la dosis es menor que en el caso de los trabajadores expuestos en general, pero mayor que la dosis para el público en general. Se recomienda una lectura conjunta, dada la dificultad del tema. Después los alumnos/as responden a las preguntas, consultando el texto.

Preguntas y tareas

1. Según la ICRP, ¿cuál es el objetivo principal de la protección radiológica?
   El objetivo principal de la protección radiológica, según la ICRP, es la protección de las personas y el medio ambiente de los efectos perjudiciales de la exposición a la radiación ionizante, sin limitar indebidamente las prácticas beneficiosas que puedan estar asociadas a dicha exposición. En otras palabras, se busca un equilibrio entre la necesidad de utilizar la radiación en beneficio de la sociedad y la obligación de proteger a los individuos y al entorno de sus riesgos.

2. Enumerar y explicar los tres principios básicos de la protección radiológica.
   Justificación:
   Ninguna práctica que implique exposición a radiaciones ionizantes debe llevarse a cabo a menos que produzca un beneficio neto para el individuo o la sociedad.

   Optimización (ALARA):
   Las exposiciones deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores económicos, sociales y tecnológicos (ALARA: As Low As Reasonably Achievable).

   Limitación de dosis:
   Las dosis individuales no deben superar los límites legales establecidos para los trabajadores expuestos y el público general, con el fin de evitar efectos deterministas y limitar los efectos estocásticos.

3. ¿Qué riesgo de radiación puede producir el manejo de un equipo de rayos X o una fuente radiactiva encapsulada? ¿Qué señal se utilizaría para advertir de este riesgo.
   Riesgo:
   El principal riesgo es la irradiación externa, ya que el equipo o fuente emite radiación ionizante que puede penetrar el cuerpo sin contacto físico directo.

   Señal de advertencia:
   Las zonas donde se vayan a manejar estos equipos se señalizan con el símbolo internacional de radiactividad, trébol con puntas radiales (riesgo de irradiación externa). El color del trébol varía en función de la zona de que se trate: vigilada, controlada, de permanencia limitada, de permanencia reglamentada o de acceso prohibido.

4. ¿Qué riesgo de radiación puede producir el manejo de fuentes radiactivas no encapsuladas? ¿Qué señal se utilizaría para advertir de este riesgo?
   Riesgo:
   Existe tanto riesgo por irradiación externa como por contaminación radiactiva, que puede producirse por contacto o dispersión de material radiactivo o por incorporación al organismo por inhalación, ingestión o absorción.

Señal de advertencia:
Las zonas donde se vayan a manejar estos equipos se señalizan con el símbolo internacional de radiactividad, trébol con puntas radiales (riesgo de irradiación externa) y con campo punteado (riesgo de contaminación). El color del trébol varía en función de la zona de que se trate: vigilada, controlada, de permanencia limitada, de permanencia reglamentada o de acceso prohibido.

5. ¿Cómo nos protegeríamos de las radiaciones ionizantes cuando el único riesgo es el de irradiación externa?
   Se aplican los principios de protección clásicos:
   Tiempo:
   Reducir el tiempo de exposición.

   Distancia:
   Aumentar la distancia respecto a la fuente.

   Blindaje:
   Interponer barreras adecuadas (plomo, hormigón, etc.) entre la fuente y el trabajador.

6. Cuando existe riesgo de contaminación ¿qué medidas se aplicarían para evitar la dispersión de la contaminación, o que esta contaminación pueda pasar a la piel o al interior del organismo?
   Cuando hay riesgo de contaminación por fuentes radiactivas no encapsuladas, además de aplicar tiempo, distancia y blindaje, deben tomarse medidas para evitar la dispersión del material y su entrada en el organismo. Se deben usar equipos de protección individual adecuados, que pueden variar desde guantes y mascarilla hasta equipos completos de protección. En caso de contaminación externa, debe eliminarse rápidamente con lavado o ducha. Si hay riesgo de dispersión al ambiente, los trabajos deben hacerse en vitrinas con extracción y filtros. También deben evitarse actividades como comer, beber o fumar en zonas contaminadas.

7. ¿Cuál es el organismo español competente en protección radiológica? ¿Dónde se recogen las normas de protección de los trabajadores expuestos y de los miembros del público contra los riesgos de las radiaciones ionizantes?
   En España, el organismo competente en protección radiológica es el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Las normas de protección tanto para los trabajadores expuestos como para los miembros del público se recogen en el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (Real Decreto 1029/2022, que deroga al RD 783/2001), así como en otras disposiciones legales nacionales y europeas que regulan la protección de trabajadores y del público.

UNIDAD 3. PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN IONIZANTE

El uso de las radiaciones ionizantes en distintos campos de la industria, medicina, investigación, etc., ha supuesto un gran avance para la humanidad, pero también pueden producir daños. Por ello es necesario establecer medidas de protección para los trabajadores/as expuestos/as, y para la población en su conjunto.

En esta unidad se van a exponer los principios básicos de la protección radiológica, los riesgos que comportan las radiaciones ionizantes en base a la naturaleza de la fuente emisora de estas radiaciones, así como las medidas de protección radiológica a aplicar.

El ser humano además de estar expuesto a la radiación ionizante del fondo natural, también está expuesto a fuentes de radiación ionizante de origen artificial.

Aunque inicialmente la utilización de fuentes de radiaciones ionizantes artificiales supuso un gran avance en el desarrollo científico de la sociedad, muy pronto se pusieron de manifiesto los daños que su mal uso podía producir en la salud. Se hizo evidente la necesidad de establecer unas medidas de protección, lo que ha dado origen a la disciplina denominada protección radiológica.

La protección radiológica tiene como finalidad la protección de los individuos, de sus descendientes y de la humanidad en su conjunto, de los riesgos derivados de aquellas actividades que supongan la presencia de radiaciones ionizantes.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) –fundada en 1928 por la Sociedad Internacional de Radiología– es la autoridad científica independiente que, desde 1950, tiene asignada la misión de establecer la base científica y la doctrina y principios en que se sustenta la protección radiológica.

La ICRP considera que el objetivo principal de la protección radiológica es evitar los efectos biológicos deterministas y limitar al máximo la probabilidad de aparición de los efectos estocásticos.

Los efectos estocásticos son aquellos efectos que son más probables cuanto mayor es la cantidad de radiación recibida, pero cuya gravedad no depende de esa cantidad de radiación. Suelen ser efectos retardados, que pueden aparecer entre 5 y 30 años después de haber sufrido exposición, como el cáncer.

Los efectos deterministas son aquellos efectos que no ocurren a no ser que la dosis de radiación recibida supere un determinado nivel y cuya gravedad depende de la cantidad de radiación recibida. Suelen ser efectos inmediatos, como náuseas, vómitos o quemaduras en la piel.

En España, las normas de protección de los trabajadores/as expuestos/as y de los miembros del público contra los riesgos de las radiaciones ionizantes figuran en el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (Real Decreto 1029/2022). El Consejo de Seguridad Nuclear es el único organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

Principios básicos de protección radiológica

Las normas de protección radiológica se sustentan en los siguientes principios:

- **Justificación:** toda práctica que implique la exposición a las radiaciones ionizantes debe suponer un beneficio para la sociedad. Deben considerarse los efectos negativos y las alternativas posibles.

- **Optimización:** todas las exposiciones a la radiación ionizante deben mantenerse a niveles tan bajos como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales (*As Low As Reasonably Achievable*, principio ALARA).

- **Limitación:** las dosis de radiación recibidas por las personas estarán, en cualquier caso, por debajo de los límites de dosis legalmente establecidos.

Se considera trabajador o trabajadora expuesto aquel o aquella que por razones de su trabajo está expuesto a las radiaciones ionizantes, con probabilidad de recibir 1/10 de los límites de dosis. Se define como miembro del público al resto de la población.

En la tabla 2.3.1 y la tabla 2.3.2 se muestran los límites recogidos en el *Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes:*

Tabla 2.3.1. Límites de dosis para trabajadores expuestos y público según el RD 1029/2022

Dosis (mSv)	Trabajadores/as expuestos/as	Miembros del público
Dosis efectiva máxima	20 mSv/año	1 mSv/año
Dosis equivalente: – Cristalino – Piel y extremidades	 100 mSv en 5 años (máximo 50 mSv/año) 500 mSv/año	 15 mSv/año 50 mSv/año

Tabla 2.3.2. Límites de dosis para trabajadoras embarazadas y personas en formación según el RD 1029/2022

Límites	Especiales
Trabajadora expuesta embarazada: dosis al feto	1 mSv/embarazo
Personas en formación y estudiantes entre 16 y 18 años	
– Dosis efectiva	6 mSv/año
– Dosis equivalente	
• Cristalino	15 mSv/año
• Piel y extremidades	150 mSv/año

Los valores recogidos en esta tabla no incluyen las dosis recibidas de la radiación de fondo de origen natural ni la recibida como consecuencia de exámenes o tratamientos médicos.

Riesgos

La ICRP utiliza el término "riesgo" como la probabilidad de que se produzca un efecto perjudicial teniendo en cuenta no solo su probabilidad sino también la gravedad del suceso.

En función de la naturaleza de la fuente emisora de radiaciones ionizantes, los riesgos de la exposición a estas radiaciones pueden ser de dos tipos:

- **Irradiación externa:** puede ser producida por todas las fuentes de radiación, aceleradores, equipos de rayos X, fuentes encapsuladas y fuentes no encapsuladas.

- **Contaminación radiactiva:** puede ser producida por fuentes no encapsuladas o cuando una fuente encapsulada ha perdido su hermeticidad.

La irradiación o exposición es la acción de someter a una persona u objeto a las radiaciones ionizantes. Se habla de irradiación externa cuando la fuente de radiación es exterior al individuo.

La contaminación es la presencia indeseada de sustancias radiactivas en la superficie o en el interior de un cuerpo u organismo. En el primer caso se habla de contaminación externa y en el segundo de una contaminación interna.

Una persona sufrirá una contaminación externa cuando se depositen sobre su piel sustancias radiactivas, mientras que la contaminación interna se producirá cuando penetren isótopos radiactivos en el organismo, bien por inhalación, por ingestión o a través de heridas. Los isótopos radiactivos que han penetrado en el organismo producen a su vez irradiación.

Una persona irradiada por una fuente radiactiva exterior a ella sufre en sus tejidos los efectos biológicos de la radiación mientras está próxima a la fuente, pero bastará que se aleje suficientemente de ella para que cese la irradiación. Por el contrario, una persona contaminada continuará siendo irradiada en tanto no cese la contaminación y ella misma puede actuar como fuente de contaminación o irradiación de otras personas.

La contaminación externa es fácilmente eliminable mediante lavado de la superficie contaminada. Mientras que en la contaminación interna los efectos dependerán de la afinidad de los elementos radiactivos, que los hace depositarse en unos u otros órganos en función de sus características metabólicas. La permanencia de la actuación de esos elementos radiactivos depende, por una parte, de la capacidad de eliminación de esa sustancia por el organismo a través de las vías naturales, y por otro, del periodo de semidesintegración del isótopo en cuestión.

En la figura 2.3.1 se muestran las diferencias entre irradiación y contaminación, aunque en estos ejemplos no serían riesgos debidos a radiación ionizantes.



Figura 2.3.1.
Conceptos de irradiación externa y contaminación.

Medidas prácticas de protección radiológica

En la práctica y con objeto de controlar la exposición a las radiaciones se aplican una serie de medidas que varían según exista (o no) riesgo de contaminación.

- Cuando una persona está sometida a la irradiación de una fuente externa, la dosis de radiación que recibe es igual al producto de la tasa de dosis (dosis recibida en la unidad de tiempo, p.ej.: µSv/h) por el tiempo durante el cual está expuesta a la radiación. Por tanto, a menos tiempo menos dosis.

La tasa de dosis en un punto es proporcional al flujo de radiación en él. Este flujo (y por tanto la tasa de dosis) decrece en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Además, la radiación ionizante es atenuada al atravesar un espesor de material interpuesto entre emisor y receptor (blindaje). Por tanto, la protección contra la irradiación por una fuente externa se consigue mediante la combinación de tres factores: tiempo de exposición, distancia y blindaje.

NORMAS BÁSICAS PARA REDUCIR LA IRRADIACIÓN EXTERNA

Distancia
Debe ser la máxima posible respecto de la fuente emisora de radiación. Hay que recordar que la dosis disminuye con la distancia (de acuerdo con la Ley del inverso del cuadrado de la distancia).

Tiempo
Debe ser el menor posible. La dosis es directamente proporcional al tiempo de exposición, si se reduce este a la mitad, la dosis se reduce de forma proporcional.

Blindaje
Cuando la combinación de tiempo y distancia no reduce la dosis a niveles permisibles, hay que interponer una barrera de material absorbente entre la fuente y el usuario.



Figura 2.3.2. Medidas para la reducción de dosis externa.

También existen medidas individuales de reducción de dosis como el delantal plomado mostrado en la figura 2.3.3, este serviría de blindaje frente a la radiación externa.



Figura 2.3.3.
Delantal plomado.

- Cuando existe riesgo de contaminación (por ejemplo, en el manejo de fuentes no encapsuladas) además de los factores anteriores de tiempo, blindaje y distancia hay que aplicar medidas adicionales. Estas medidas adicionales tienen por objeto evitar la dispersión de la contaminación, o que esa contaminación se deposite en la piel de una persona o, incluso, pueda llegar al interior de su organismo.

Se deben utilizar equipos de protección individual que sean adecuados a la posible contaminación. Así, en unas condiciones puede ser suficiente el uso de guantes de algodón y mascarilla de aerosoles, mientras que en casos extremos pueden necesitarse equipos autónomos de respiración, doble mono, calzas, guantes de algodón, guantes de plástico, etc. (figura 2.3.4).



Figura 2.3.4.
Equipos de protección individual.

En caso de contaminación externa del organismo, hay que eliminarla para evitar que esta se convierta en contaminación interna. Las medidas consisten en quitar la ropa, almacenándola en bolsas de plástico, ducharse con agua tibia y jabón neutro, en el caso de que la contaminación sea difusa, o simplemente lavar las zonas contaminadas, en el caso de que estas se reduzcan a áreas definidas.

Si existe la posibilidad de que se produzca dispersión de la contaminación al ambiente (material radiactivo en forma de aerosol, polvo o vapores) los trabajos se realizarán en el interior de una vitrina de extracción que, en caso necesario, puede incorporar filtros.

Si se efectúan trabajos en una zona contaminada con material radiactivo, siempre que sea posible se aplicarán previamente técnicas de descontaminación.

En este tipo de ambientes se deben prohibir actividades como por ejemplo comer, beber o fumar, ya que facilitaría la incorporación al interior del organismo de la contaminación allí existente.

Normas generales de protección que deben ser establecidas a todas las prácticas que impliquen un riesgo derivado de las radiaciones ionizantes

Finalmente, existen unas normas generales de protección que deben aplicarse en zonas donde exista riesgo de emisión de radiaciones ionizantes. Entre ellas destacaremos:

- **Delimitación de zonas:** el espacio en el que existan generadores de radiación o donde se manipulen o almacenen materiales radiactivos, debe estar perfectamente delimitado y señalizado. Los reglamentos establecen los criterios de clasificación de zonas y el tipo de señalización a utilizar en cada una de ellas.

Las zonas se señalizan con el símbolo internacional de radiactividad, trébol con puntas radiales (riesgo de irradiación externa) o con campo punteado (riesgo de contaminación). El color del trébol varía en función de la zona de que se trate: vigilada, controlada, de permanencia limitada, de permanencia reglamentada o de acceso prohibido (figura 2.3.5).

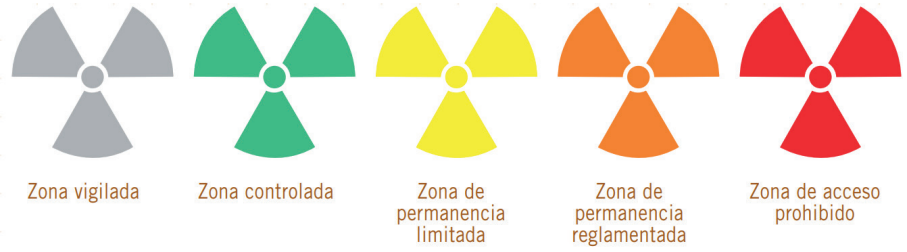


Figura 2.3.5. Colores empleados para la señalización de cada una de las zonas.

En el caso de existir riesgo por irradiación se señalizará con un trébol bordeado de puntas radiales, si existiera riesgo de contaminación y el riesgo de exposición externa fuera despreciable, se utilizará el trébol en campo punteado y si existiera conjuntamente riesgo de contaminación y de exposición se empleará el trébol general de la zona bordeado de puntas radiales en campo punteado. Por ejemplo, en la figura 2.3.6 se muestra una zona controlada con riesgo de irradiación y contaminación.



Figura 2.3.6.
Pictograma de zona controlada con riesgo de irradiación externa y contaminación.

- **Formación del personal** que va a trabajar con radiaciones ionizantes sobre los efectos de la radiación, las normas de protección y las precauciones a tomar durante el trabajo.
- **Vigilancia médica** basada en los principios generales de medicina del trabajo.
- **Vigilancia radiológica** mediante el uso de dosímetros.

Puntos clave

La utilización de fuentes de radiaciones ionizantes en distintos campos comporta unos beneficios pero también lleva consigo el riesgo de producir daños a la salud.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) tiene asignada la misión de establecer la base científica y la doctrina y principios en que se sustenta la protección radiológica.

Las normas de protección radiológica se sustentan en tres principios: justificación, optimización (principio ALARA) y establecimiento de unos límites de dosis.

Los riesgos de la exposición a estas radiaciones ionizantes pueden ser por irradiación o por contaminación y los medios de protección dependerán del tipo de riesgo. La protección contra la irradiación por una fuente externa se consigue mediante la combinación de tres factores: tiempo de exposición, distancia y blindaje.

Cuando existe riesgo de contaminación además de los factores anteriores hay que aplicar medidas adicionales como puede ser, entre otros, la utilización de equipos de protección individual.

Preguntas y respuestas

1. Según la ICRP, ¿cuál es el objetivo principal de la protección radiológica?
2. Enumera y explica los tres principios básicos de la protección radiológica.
3. ¿Qué riesgo de radiación te puede producir el manejo de un equipo de rayos X o una fuente radiactiva encapsulada? ¿Qué señal se utilizaría para advertir de este riesgo?
4. ¿Qué riesgo de radiación te puede producir el manejo de fuentes radiactivas no encapsuladas? ¿Qué señal se utilizaría para advertir de este riesgo?
5. ¿Cómo te protegerías de las radiaciones ionizantes cuando el único riesgo es el de irradiación externa?
6. Cuando existe riesgo de contaminación, ¿qué medidas aplicarías para evitar la dispersión de la contaminación, o que esta contaminación pueda pasar a la piel o al interior del organismo?
7. ¿Cuál es el organismo español competente en protección radiológica? ¿Dónde se recogen las normas de protección de los trabajadores y de los miembros del público contra los riesgos de las radiaciones ionizantes?

UNIDAD 4. APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Relacionará las técnicas de diagnóstico (radiodiagnóstico, medicina nuclear y técnicas in vitro) con sus principales aplicaciones.
- Explicará la aplicación de la informática al diagnóstico en medicina.
- Describirá en qué consiste la radioterapia y cómo se utiliza en el tratamiento contra el cáncer.
- Inferirá la importancia de evaluar ventajas y riesgos de la radiación ionizante en medicina.
- Interpretará la importancia de una gestión adecuada de los residuos radiactivos generados en las aplicaciones médicas de la radiación ionizante.

Tiempo mínimo propuesto

2 horas.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad, puede consultarse el capítulo 5 del suplemento técnico, *Efectos biológicos de la radiación ionizante y aspectos legales.*

Sugerencias didácticas

En esta unidad se estudian de forma detallada las técnicas médicas que utilizan la radiación ionizante. Es un tema denso en cuanto a conceptos y términos nuevos para el alumnado, referidos principalmente a medicina.

Se puede iniciar el tema mostrando o buscando imágenes en Internet según la técnica utilizada (rayos X, TC...). A continuación, el alumnado lee el tema y responde las preguntas propuestas.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué es el radiodiagnóstico?
   Es el conjunto de procedimientos de exploración y visualización de las estructuras anatómicas del interior del cuerpo humano mediante la utilización de los rayos X.

2. ¿Cómo se producen los rayos X?
   Los rayos X se producen en un tubo de vacío aplicando una alta tensión (kV) entre dos electrodos opuestos, y generando una corriente de electrones dentro de dicho tubo mediante un filamento incandescente. Los electrones son acelerados por esta diferencia de potencial y al chocar con el material que forma el electrodo positivo o ánodo, generan los rayos X.

3. ¿Quién descubrió los rayos X? ¿Cuándo?
   Los rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Röentgen en 1895.

4. ¿Qué es la radiología digital?
   Es la aplicación de la informática al diagnóstico médico, en la que la señal procedente de la atenuación diferencial de los rayos X por las estructuras anatómicas, se registra en forma digitalizada; es decir, a cada elemento de la imagen se le asigna un número que corresponde al nivel de señal que alcanza esa zona de la imagen, según la atenuación que se produce. De esta manera, esta información se puede manipular para mejorar su utilidad diagnóstica, archivar o enviar a distancia.

5. ¿Qué significan las siglas PET? ¿Qué es el PET y para qué se utiliza? ¿Qué radionucleidos se utilizan en esta técnica?
   El acrónimo PET está formado por las iniciales en inglés de *Positron emision tomography*, Tomografía por emisión de positrones.
   Es un procedimiento diagnóstico, en el que se administran a los pacientes compuestos marcados con isótopos radiactivos emisores de positrones, de muy corto periodo de semidesintegración. Estos compuestos tienen afinidad por determinadas moléculas muy presentes en importantes funciones metabólicas (oxígeno, carbono, etc.). El positrón dentro del cuerpo se aniquila rápidamente con un electrón, emitiendo siempre fotones de una energía determinada en direcciones opuestas, lo que permite una precisa localización de la zona en que se ha captado la sustancia marcada.
   Permite obtener información funcional y metabólica de diversas patologías, por ejemplo, cardiaca, neurológica y oncológica.
   El radionucleido más utilizado es el flúor-18

6. ¿Qué significa que una técnica sea *in vitro*? ¿Qué radionucleidos se utilizan en esta técnica?
   Son técnicas que emplean actividades muy pequeñas de trazadores radiactivos que pueden marcar y determinar la concentración de sustancias, si

están presentes, en una muestra biológica obtenida previamente del paciente, depositada en un tubo de ensayo tras una adecuada preparación de la misma. La gran diferencia por tanto es que no implican ningún riesgo de radiación para el paciente.
Los radionucleidos más usados son el yodo-125 y, cromo-51 y hidrógeno-3 (tritio).

7. ¿Qué es la radioterapia? ¿Qué fuentes de radiación se utilizan en radioterapia?
Es la aplicación de altas dosis de radiación a zonas delimitadas, por constituir o contener tejidos y células tumorales, con el fin de destruirlas o detener la proliferación de las mismas, procurando irradiar lo menos posible el resto de tejidos y órganos sanos circundantes.

Como fuentes de radiación se utilizan:
Equipos de rayos X de energías superiores a las empleadas en radiodiagnóstico. Aceleradores lineales de electrones, de los que se pueden utilizar para el tratamiento los electrones directamente o, mucho más habitualmente, los fotones que se generan por la interacción de los electrones al chocar con un blanco.
Fuentes radiactivas encapsuladas, emisores de radiación beta y gamma, colocadas en el cuerpo en implantes permanentes o temporales.

8. ¿Qué dice la normativa vigente sobre la protección radiológica del paciente expuesto a radiaciones ionizantes?
Se debe garantizar la mejora continua de la calidad y eficacia de las prácticas médicas que emplean radiaciones ionizantes, evitando exposiciones inadecuadas o excesivas, sin impedir el uso beneficioso de las radiaciones ionizantes.
Toda exposición a la radiación ionizante en un acto médico deberá estar justificada previamente, mostrando un beneficio neto.
Se optimizará la protección radiológica de las personas sometidas a exposiciones médicas, con el objetivo de mantener las dosis individuales tan bajas como razonablemente sea posible, siendo coherente con la finalidad médica.

9. ¿Qué tipos de residuos radiactivos se generan en medicina?
Los residuos radiactivos generados en las aplicaciones médicas de las radiaciones son de baja y media actividad. Suelen constituir este tipo de residuos objetos como toallas de papel, algodones y gasas, jeringas usadas y viales con restos, guantes u otros elementos desechables de protección, además de las excretas de los pacientes sometidos a terapia con radiofármacos, ropa y material de lencería usada por ellos, etc.

UNIDAD 4. APLICACIONES MÉDICAS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

La radiación ionizante, bien en forma de isótopos radiactivos (radiofármacos y radiotrazadores), fuentes radiactivas encapsuladas o la que se obtiene mediante generadores de radiaciones ionizantes (RX), se utiliza tanto para estudiar el funcionamiento de nuestro organismo como para el tratamiento de diferentes enfermedades, entre las que se incluye el cáncer.

En 1895, Wilhelm Röentgen descubrió los rayos X y reconoció su capacidad de penetrar en el cuerpo humano. Los huesos absorben en gran medida los rayos X, por lo que una placa fotográfica expuesta a los rayos X que hubieran atravesado el organismo, mostraría una sombra de los huesos que proporciona una imagen de su forma y posición en el interior del cuerpo. Posteriormente se han ido perfeccionando los equipos y ahora pueden mostrar órganos y tejidos del cuerpo con gran detalle.

En Medicina hay dos aplicaciones principales de la radiación ionizante: el diagnóstico y la terapia.

Diagnóstico

Radiodiagnóstico

Es la primera de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en Medicina ya que pocos meses después del descubrimiento de los rayos X por Roëntgen se obtuvieron las primeras imágenes con fines de diagnóstico médico.

Se conoce con el nombre de radiodiagnóstico el conjunto de procedimientos de exploración y visualización de las estructuras anatómicas del interior del cuerpo humano mediante la utilización de los rayos X. Ocupa un lugar preponderante entre las técnicas de imagen debido al gran número de instalaciones, de exploraciones que se realizan y de profesionales que se dedican a esta especialidad.

Los rayos X se producen de forma artificial en un tubo de vacío aplicando una determinada tensión (kV) entre dos electrodos opuestos, y generando una corriente de electrones dentro de él, a partir de un filamento incandescente. Los electrones son acelerados por esta diferencia de potencial y al chocar con el material que forma el electrodo positivo o ánodo, generan los rayos X. Cuanto mayor es la tensión aplicada, mayor es la penetración de estos rayos. Estos pueden variar desde 25 kV para la mamografía hasta 140 kV en diagnóstico general. La imagen radiográfica es una consecuencia de la diferente atenuación que las distintas estructuras anatómicas del paciente producen en el haz de rayos X que incide sobre él.

Si a un paciente se le hace una radiografía de tórax, la parte de la radiografía correspondiente al pulmón estará más oscura que una zona que quede por detrás del hueso, ya que los pulmones fundamentalmente tienen aire y este atenúa la radiación menos que el hueso, por tanto, a esta parte de la película radiográfica llegará más radiación y aparecerá más oscura.

Hay varios tipos de estudios radiológicos:

- Radiografía convencional: en este caso, el receptor de imagen es actualmente un detector de radiación que obtiene directamente un registro digitalizado de la intensidad de radiación en cada zona del área explorada, más o menos atenuada tras atravesar el cuerpo, en una proyección plana. Dentro de la radiología convencional, existen distintos tipos de exámenes radiológicos como son: tórax, abdomen, columna lumbar, columna cervical, columna dorsal, etc.

- Tomografía Computarizada (TC): lo que diferencia a esta técnica es que no presenta proyecciones planas de la atenuación producida por el cuerpo, sino que reconstruye imágenes de cortes (habitualmente transversales o axiales) del cuerpo humano, a través de algoritmos informáticos que posibilitan incluso una reconstrucción en tres dimensiones. La geometría del equipo es tal que se hace girar el tubo de rayos X, proyectando un haz de rayos X en forma de abanico alrededor del paciente, con los detectores enfrentados siempre a él, a la vez que se hace avanzar la camilla que soporta al paciente, de forma que se pueden obtener imágenes de una zona anatómica muy amplia.

- Otro tipo de exploraciones convencionales muy habituales son las dentales. Se realizan con equipos de rayos X adaptados en su geometría para obtener imágenes específicas de estas zonas. Las radiografías más comunes en este campo son las intraorales (colocando un pequeño detector dentro de la boca), las ortopantomografías (imágenes panorámicas de toda la mandíbula, ver figura 2.4.1) y los TC (Tomografía Computerizada) dentales, que obtienen imágenes en determinados cortes.



Figura 2.4.1. Ejemplo de ortopantomografía o radiografía dental panorámica.

- Fluoroscopia: emplea el mismo tipo de detector que en la radiografía convencional descrita antes, pero con la diferencia de que en este caso la imagen formada se presenta en tiempo real en un monitor y tiene carácter dinámico. Muestra el movimiento interno de los órganos y es capaz de seguir cualquier alteración que se produzca en las condiciones de atenuación, lo que posibilita observar por ejemplo el paso de un medio de contraste por vasos sanguíneos, etc.

- Intervencionismo: la radiología y la cardiología intervencionista son subespecialidades, que mediante procedimientos mínimamente invasivos, diagnostican y tratan diversas patologías, tanto en el sistema vascular como fuera de él. La radiología intervencionista permite por tanto, tras iniciar el procedimiento con una intención diagnóstica, aplicar a la vista de los hallazgos encontrados y las opciones existentes, acciones terapéuticas, evitando procesos quirúrgicos que entrañan más riesgos y recuperaciones más complicadas reduciendo el tiempo de hospitalización posterior.

  El intervencionismo se engloba dentro de un grupo amplio de procedimientos, cada vez más numerosos, que se pueden definir como el uso de la imagen dinámica producida por equipos de rayos X, para el guiado de procedimientos realizados en el interior del cuerpo humano. Se puede ver un ejemplo de una sala dedicada a intervencionismo en la figura 2.4.2.



Figura 2.4.2. Sala dedicada a radiología intervencionista.

- La aplicación de la informática al diagnóstico médico ha permitido mejorar la obtención, el almacenamiento y el tratamiento de la imagen (lo que se conoce como radiología digital). El tratamiento digital de las imágenes médicas se utiliza en técnicas como la tomografía computarizada (TC), la angiografía digital, la medicina nuclear y, la radiología convencional, incluso en las dentales.

  Esta característica de poder tratar la imagen digital aporta gran valor. Es decir, si una radiografía ha salido muy clara se puede oscurecer en su presentación en un monitor o a la inversa, aclarar. También se pueden seleccionar determinadas zonas de la imagen y ampliar para su estudio más detallado, realzar los bordes o tratar de obtener más definición de pequeños detalles, suavizar el aspecto demasiado "granulado" de una imagen, etc. En la actualidad, el desarrollo de la informática permite, no solo el tratamiento, sino también la transmisión de dichas imágenes a larga distancia y la posibilidad de su archivo electrónico.

Una aplicación muy importante de este tipo de radiología es la sustracción digital, que consiste en eliminar de una imagen radiográfica aquellas estructuras anatómicas que no se desea estudiar, destacando más acusadamente la zona de interés. Ello se consigue mediante la administración por vía intravenosa de contrastes y la aplicación de algoritmos de procesado que "restan" una imagen de otra, presentando solo la "diferencia" entre ambas (es decir, la imagen generada por el contraste).

Medicina nuclear diagnóstica

Es la especialidad médica que realiza diagnósticos obteniendo imágenes e información funcional mediante la utilización de radiotrazadores. Estos son compuestos marcados con un isótopo radiactivo, que permiten estudiar la morfología y el funcionamiento de los órganos. Se incorporan a ellos y emiten una pequeña cantidad de radiación que es detectada desde el exterior del cuerpo por unos equipos adecuados, acompañados por una electrónica y software que permite situar el lugar concreto de la emisión dentro del cuerpo.

Los datos funcionales que aporta la medicina nuclear son muy diversos y valiosos, por ejemplo, de la función renal o pulmonar, como del cerebro o la función cardiaca.

Como técnicas fundamentales, destacan el SPECT (por sus siglas en inglés de Tomografía computarizada de emisión de fotón único), y el PET (Tomografía por emisión de positrones).

A ambas modalidades de equipo detector, actualmente es habitual que vaya asociado un equipo de TC, cuyo uso simultáneo permite mejoras importantes en la calidad de la imagen y diagnóstico obtenido, pues se combina la información funcional con la morfológica y una más precisa localización anatómica.

Como ejemplos típicos de aplicaciones:

- Spect cerebral: se realiza para valorar el flujo sanguíneo en las distintas áreas cerebrales y por lo tanto proporciona información acerca del funcionamiento del cerebro. Es de gran utilidad en el diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer, demencias y epilepsia, ya que permite localizar las áreas del cerebro que no funcionan correctamente. Puede verse un ejemplo de su apariencia en la figura 2.4.3.

- Spect cardiaco: se realiza para valorar el flujo sanguíneo del músculo cardiaco (miocardio). Si se hace en reposo, permite detectar zonas musculares muertas (a causa de un infarto de miocardio). Y si se efectúa tras estímulos físicos o farmacológicos permite detectar zonas musculares que reciben

poca sangre (isquemia coronaria). Valora, pues, la repercusión funcional de las alteraciones anatómicas y se utiliza para seleccionar los pacientes que deben someterse a un cateterismo cardiaco.

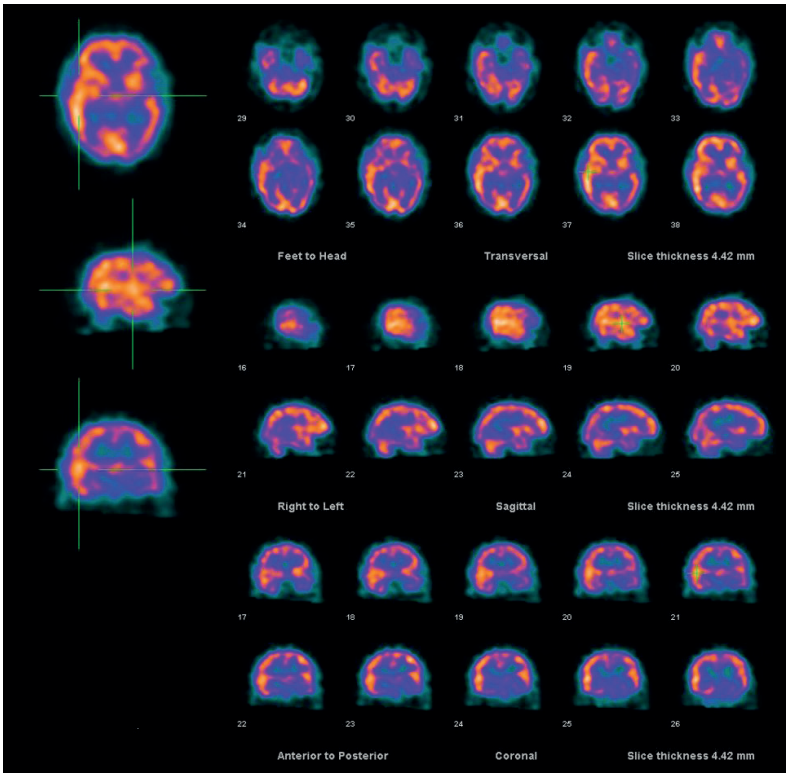


Figura 2.4.3. Imágenes obtenidas de un SPECT cerebral.

El PET es un proceso de diagnóstico por imagen en el cual se administran a los pacientes isótopos radiactivos emisores de positrones, de muy corto periodo de semidesintegración, con los que se marcan moléculas que se unen a elementos fundamentales de las diferentes moléculas del organismo (oxígeno, carbono, etc.). El positrón dentro del cuerpo se aniquila rápidamente con un electrón, emitiendo siempre fotones de una energía determinada en direcciones opuestas, lo que permite una precisa localización (mejorada gracias a la presencia simultánea del TC, como se puede ver en la figura 2.4.4) de la zona en que se ha captado la sustancia marcada.

Mediante este método de diagnóstico, se obtiene información de cómo funcionan las células de los órganos o tejidos objeto de estudio, suministrando por tanto información metabólica de los mismos. El isótopo radiactivo más utilizado es el flúor-18, con el que se marcan moléculas de glucosa y permite estudiar el metabolismo cerebral, hepático, renal o de cualquier otro órgano.

Toda unidad PET, consta de tres componentes esenciales: el ciclotrón, donde se producen los isótopos a utilizar, el laboratorio de radioquímica, donde se

realizan los procesos de síntesis y marcaje de las diversas moléculas utilizadas y la cámara PET, mediante la cual se hace el diagnóstico del paciente. Es muy habitual que el centro sanitario disponga solo de la cámara PET, recibiendo el radiotrazador PET ya preparado para su administración desde una instalación externa que dispone del ciclotrón.

El PET es fundamental en el estudio de patología cardiaca, neurológica y oncológica.

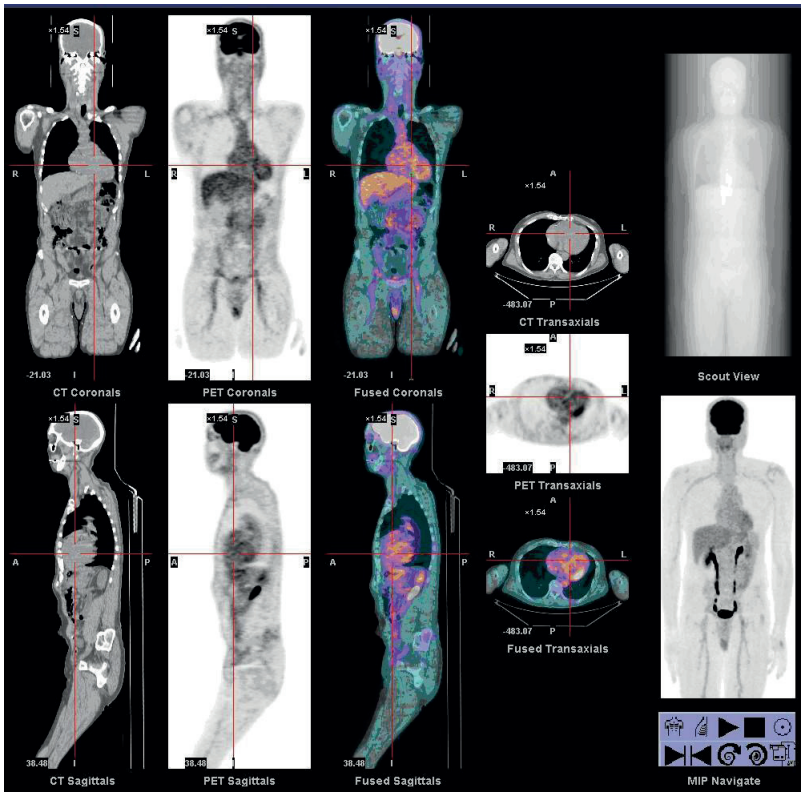


Figura 2.4.4.
De izquierda a derecha, imágenes de TC, imágenes de PET, e imágenes fruto de la fusión de las dos modalidades, PET-TC.

Estudios *in-vitro*

Existen algunas técnicas de análisis clínico o investigación biológica que emplean actividades muy pequeñas de trazadores radiactivos, con el fin de detectar y medir la concentración de numerosas sustancias (hormonas, fármacos, etc.) en muestras biológicas obtenidas, previamente, del paciente. Tienen una elevada sensibilidad, permitiendo medir concentraciones muy pequeñas. Son técnicas realizadas *in vitro* (en un tubo de ensayo) por lo que el paciente no está en contacto con el material radiactivo. Generalmente, las muestras se marcan radiactivamente con yodo-125 y, en otros casos, con hidrógeno-3 (tritio), con actividades muy pequeñas.

Terapia

Radioterapia

El objetivo de la radioterapia es la destrucción de células y tejidos tumorales mediante la aplicación de altas dosis de radiación, procurando irradiar lo menos posible los tejidos sanos circundantes al tumor. Ello se consigue mediante una planificación individualizada para cada paciente, utilizando imágenes diagnósticas del paciente (por ejemplo, de TC, PET o resonancia magnética) y planificadores, que permiten la reconstrucción de la distribución de la dosis y de la zona anatómica a irradiar en una imagen tridimensional conjunta. Un tratamiento con radioterapia tiene que tener en cuenta lo siguiente:

- Características de la radiación que se va a utilizar.
- Condiciones geométricas del haz y de la zona anatómica a tratar.
- Respuesta celular (tipo de tumor, reparación celular, radiosensibilidad, etc.).
- Proximidad de órganos críticos (en los que no se debe sobrepasar un límite de dosis).
- Condicionantes como el movimiento interno de órganos, el cambio de la anatomía a lo largo del tratamiento, o en general, todas las posibles fuentes de variabilidad en las condiciones de irradiación planificadas.

En radioterapia, se utilizan las siguientes fuentes de radiación ionizante:

- Equipos de rayos X y aceleradores lineales de electrones. La radiación de un tubo de rayos X puede producirse con diferentes niveles de energía, de forma que el poder de penetración de la radiación ionizante puede ajustarse a la profundidad del tumor. Los aparatos de rayos X para terapia trabajan hasta con 250 000 voltios. Para un voltaje más elevado debe utilizarse un acelerador lineal que aumenta la energía por etapas y ésta puede alcanzar hasta 20 millones de voltios (20 MV).

  La radioterapia externa con aceleradores lineales es la técnica de terapia con radiaciones más extendida en la actualidad.

  Un acelerador presenta una estructura por donde emerge la radiación, llamada brazo, que acaba en un cabezal donde se configura la forma del campo de radiación de una manera muy precisa, mediante los llamados colimadores multi-láminas; todo el cabezal puede girar alrededor del paciente, que permanece tumbado en una mesa de tratamiento, de manera que la incidencia de la dosis se reparte desde muchas orientaciones, para concentrar una dosis alta en la zona deseada donde se hacen confluir todos estos haces

- Braquiterapia. Utiliza la radiación beta y gamma de isótopos que, en forma de fuente encapsulada, pueden introducirse en el cuerpo del paciente.

  En función de la intensidad de las fuentes que se emplean, y por tanto del tiempo durante el que la fuente está irradiando al paciente para alcanzar

la dosis prescrita, se puede hablar de dos modalidades principales de esta técnica: braquiterapia de baja y de alta tasa de dosis.

En la primera, es habitual que los implantes de fuentes sean permanentes, es decir, no se retiran las fuentes transcurrido un tiempo, sino que quedan dentro del organismo. Ello se puede hacer así porque, debido a las características de emisión y al periodo de semidesintegración de los isótopos elegidos, transcurrido un tiempo no representan un riesgo de irradiación hacia el exterior, ni aportan al paciente una dosis excesiva. Un ejemplo de ellos son los llamados implantes de semillas de yodo-125 o paladio-103 para el tratamiento del cáncer de próstata, como las que se pueden apreciar en la figura 2.4.5.

En el otro caso, la alta tasa de dosis originada por una única fuente de pequeño tamaño (del orden de milímetros), permite su colocación sucesiva, mediante guías o aplicadores que se introducen en cavidades del cuerpo o se insertan en los tejidos, en posiciones bien definidas por un tiempo calculado previamente. De esta forma, se consigue la distribución de dosis buscada con tratamientos que duran pocos minutos, en los que la fuente se proyecta dentro del paciente y se retira de él de forma remota. En esta modalidad, los isótopos más frecuentemente usados son iridio-192 y cobalto-60.

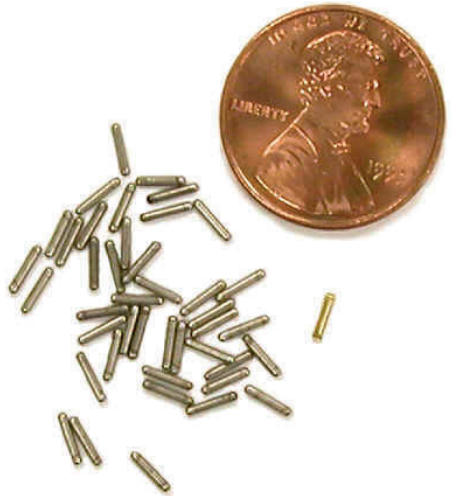


Figura 2.4.5.
Detalle del tamaño y forma de las “semillas”, fuentes radiactivas destinadas a un tratamiento de braquiterapia de próstata.

Otras técnicas de radioterapia

Existen variaciones en la forma de impartir la radiación al tumor, en los equipos que se emplean, o en la forma de fraccionar los tratamientos en sesiones.

Por ejemplo, se puede citar la tomoterapia, en donde la dosis se imparte mediante una geometría similar a la de un TC diagnóstico, o la radioterapia intraoperatoria, en la que se realiza un procedimiento quirúrgico para extirpar tejidos tumorales y/o dejar más accesible la zona a irradiar, y en el curso del cual

se imparte un tratamiento con un acelerador en una única sesión, para después concluir el procedimiento quirúrgico (ilustrado en la figura 2.4.6).

También está adquiriendo gran protagonismo la terapia con protones o protonterapia, dada su capacidad de depositar la dosis de manera muy localizada. Esto es de especial interés en caso de tumores situados cerca de órganos o estructuras muy sensibles y también hace posible alcanzar dosis más altas en los tratamientos mejorando el control tumoral y/o reduciendo posibles efectos adversos, de especial importancia en pacientes pediátricos que tienen una esperanza de vida superior a los adultos.

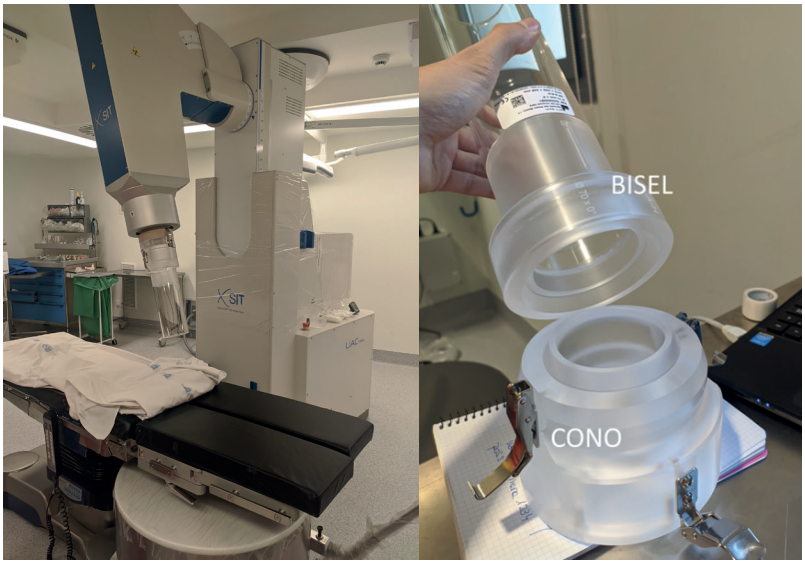


Figura 2.4.6. Acelerador móvil de electrones dedicado a radioterapia intraoperatoria y detalle de los aplicadores y conos destinados a focalizar el haz de electrones.

Terapia en medicina nuclear

Radioterapia metabólica

Como se ha comentado, algunos radiofármacos pueden introducirse en el interior del cuerpo del paciente y aprovechar la captación preferente que algunos órganos tienen sobre determinados elementos. El tratamiento más habitual y eficaz en esta llamada terapia metabólica ha sido el de los tumores de la glándula tiroides, que tiene afinidad por captar el yodo. Administrando uno de los isótopos radiactivos del yodo (yodo-131), se consigue una irradiación muy selectiva del tiroides.

Terapia molecular o dirigida

Aquí los isótopos emisores de radiación con los que se persigue administrar la terapia, se combinan en compuestos que tienen afinidad por unirse a ciertas moléculas diana, que están presentes específicamente en las células tumorales en mayor medida que en el resto de las células. Esto permite dirigir más la terapia, consiguiendo que el tumor reciba dosis muy superiores al tejido sano.

Transporte de material radiactivo

El material radiactivo usado para diagnóstico o terapia (fuentes encapsuladas y no encapsuladas) requiere ser transportado desde los suministradores hasta las instalaciones donde va a ser usado o administrado a los pacientes. La mayor parte del transporte que se efectúa consiste en pequeñas cantidades de material radiactivo (que se usa con fines de diagnóstico médico), aunque a veces se transportan fuentes de alta actividad necesarias para terapia.

La vía aérea es la vía más utilizada en el transporte de material radiactivo usado en medicina, ya que, por su naturaleza, al tratarse de isótopos emisores generalmente de corto periodo de semidesintegración, sufren un rápido decaimiento radiactivo, y precisan ser transportados de manera urgente.

El resto del trayecto hasta su destino final, en hospitales o centros sanitarios, estos materiales que van contenidos en embalajes generalmente de pequeño tamaño, y con un blindaje adecuado para que la tasa de dosis en el exterior sea suficientemente baja, son transportados por carretera.

En España, el transporte de material radiactivo está regulado por una serie de reglamentos de aplicación internacional, basados en el *Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos del OIEA* (Organismo Internacional de Energía Atómica).

Protección radiológica

En lo que se refiere a la protección radiológica del paciente, la legislación española ha traspuesto la Directiva Europea 2013/59/Euratom, que fija entre otras las medidas de radioprotección del paciente, en varios reales decretos. El objetivo es garantizar la mejora continua de la calidad y eficacia de las prácticas médicas que emplean radiaciones ionizantes, evitando exposiciones inadecuadas o excesivas, sin impedir el uso de las radiaciones ionizantes en el plano de la detección precoz, diagnóstico o tratamiento de enfermedades. Entre las disposiciones más importantes reflejadas en la normativa vigente están:

- Toda exposición a la radiación ionizante en un acto médico deberá estar justificada previamente, mostrando un beneficio neto, teniendo en cuenta los posibles beneficios diagnósticos y terapéuticos, frente al detrimento que pueda causar la exposición.

  La protección radiológica de las personas sometidas a exposiciones médicas se optimizará con el objetivo de mantener las dosis individuales tan bajas como razonablemente sea posible, siendo coherente con la finalidad médica.

Toda exposición médica tendrá lugar bajo la responsabilidad clínica de un profesional sanitario habilitado (Real Decreto 601/2019, de 18 de octubre, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas).

- Todo el personal involucrado (especialistas médicos y radiofísicos, personal de enfermería y técnicos) deben poseer los conocimientos adecuados sobre las técnicas aplicadas y las normas de radioprotección, lo que se acredita con títulos específicos de operadores, supervisores o directores de instalaciones, que expide el organismo regulador, el CSN.

- Todas las instalaciones serán objeto de vigilancia estricta por parte de las autoridades competentes.

Residuos radiactivos

Se denomina residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho para el cual no está previsto ningún uso, que está contaminado o que contiene isótopos radiactivos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por la autoridad competente, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear.

En el sector sanitario los residuos radiactivos son de baja y media actividad. Suelen constituir este tipo de residuos objetos tales como toallas de papel, algodones y gasas, jeringas usadas y viales, guantes u otros elementos desechables de protección). Se generan fundamentalmente en las instalaciones de medicina nuclear, tanto en el área de diagnóstico como de terapia metabólica (en este caso se trata de las excretas de los pacientes, ropa y material de lencería usada por ellos o restos de comida), como en laboratorios de análisis e investigación.

Un aspecto importante para conseguir un buen nivel de protección radiológica, es realizar una correcta gestión de los residuos radiactivos, que permita minimizar los riesgos de contaminación e irradiación para los trabajadores expuestos y el público en general y reducir el impacto de los mismos sobre el medio ambiente. Para ello es necesario clasificar los residuos, segregarlos, etiquetarlos y gestionarlos adecuadamente.

Los residuos radiactivos son gestionados de una de las dos siguientes maneras complementarias. La primera opción y la más habitual, aprovecha que estos restos son una pequeña parte de la actividad inicial utilizada y suelen presentar valores de actividad muy bajos. Si además su periodo de semidesintegración no es muy elevado, pueden almacenarse controladamente en lugares específicos adecuados, durante un tiempo calculado previamente, hasta que la actividad haya decaído a unos niveles legislados para cada isótopo (niveles de

desclasificación), por debajo de los cuales se considera que ese residuo ya no es radiactivo, pues no constituye un riesgo su tratamiento como basura normal.

Si el tiempo calculado para alcanzar el decaimiento necesario para lo anterior es muy grande, de manera que no es razonable un almacenamiento controlado tan prolongado (porque además se acumularía un volumen y actividad de residuos excesivo), se gestionan por la segunda opción. La retirada por la empresa autorizada para esta gestión final de los residuos, Enresa, entidad de carácter público sin ánimo de lucro.

Enresa es la que transporta estos residuos hasta el centro de tratamiento y almacenamiento de El Cabril, situado en el municipio de Hornachuelos (Córdoba), el único almacén definitivo de residuos radiactivos de muy baja, baja y media actividad de España, del que se muestran imágenes en la figura 2.4.7.



Figura 2.4.7.
Detalle del acondicionamiento de los residuos de media y baja actividad, y aspecto general exterior de las celdas de almacenamiento final.

UNIDAD 4

FICHA DEL ALUMNADO

PUNTOS CLAVE

- **En medicina hay dos aplicaciones principales de la radiación ionizante: el diagnóstico y la terapia.**
- **Existen diferentes técnicas de diagnóstico mediante los rayos X y los isótopos radiactivos. Existen diferentes técnicas de tratamiento en función de que se usen rayos X o fuentes radiactivas.**
- **El objetivo de la protección radiológica del paciente es garantizar la mejora de la calidad y eficacia de los actos médicos que emplean radiaciones ionizantes, evitando exposiciones inadecuadas o excesivas, sin impedir el uso beneficioso de las radiaciones ionizantes en el diagnóstico y tratamiento de las diferentes enfermedades.**
- **Se debe hacer una correcta gestión de los residuos radiactivos, que permita minimizar los riesgos de contaminación e irradiación para los trabajadores expuestos y el público en general y reducir el impacto de los mismos sobre el medio ambiente**

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué es el radiodiagnóstico?

2. ¿Cómo se producen los rayos X?

3. ¿Quién descubrió los rayos X? ¿Cuándo?

4. ¿Qué es la radiología digital?

5. ¿Qué significan las siglas PET? ¿Qué es el PET y para qué se utiliza? ¿Qué radionucleidos se utilizan en esta técnica?

6. ¿Qué es el radioinmunoanálisis? ¿Qué significa que sea una técnica *in vitro*? ¿Qué radionucleidos se utilizan en esta técnica?

7. ¿Qué es la radioterapia? ¿Qué fuentes de radiación se utilizan en radioterapia?

8. ¿Qué dice la normativa vigente sobre la protección radiológica del paciente expuesto a radiaciones ionizantes?

9. ¿Qué tipos de residuos radiactivos se generan en medicina?

UNIDAD 5. OTRAS APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Podrá clasificar las distintas fuentes de radiaciones ionizantes.
- Citará cualitativamente los fenómenos físicos que tienen lugar cuando la materia interacciona con la radiación y cuando la radiación interacciona con la materia.
- Identificará al menos tres sectores en los que la radiación ionizante tiene aplicaciones.
- Podrá nombrar y describir alguna aplicación concreta de la radiación en la industria.
- Reproducirá que un efecto de la radiación es la esterilización y conocerá los campos en los que se utiliza la radiación para esterilización.
- Escribirá los cambios que la radiación produce en determinados materiales.
- Podrá nombrar y describir alguna aplicación concreta de la radiación en investigación.
- Nombrará alguna aplicación de la radiación basada en el empleo de radiotrazadores.

Tiempo mínimo propuesto

50 minutos.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre las aplicaciones de la radiación se puede consultar la unidad 4 de este nivel, donde se tratan las aplicaciones médicas y el capítulo 7 del suplemento técnico.

Sugerencias didácticas

En esta unidad se repasan las numerosas aplicaciones de la radiación ionizante en diferentes sectores. Algunas de ellas son conocidas (datación con carbono-14 o la esterilización de insectos para controlar las plagas). Sin embargo, existen otras aplicaciones muy interesantes, que no son tan conocidas y es conveniente que los alumnos/as entiendan.

La descripción de estas aplicaciones es muy práctica, sin entrar exactamente en el funcionamiento de cada aparato o técnica, si no que se explica, fundamentalmente, en qué y para qué se utiliza. Quizás la primera parte requiera una explicación sobre los fenómenos físicos que tienen lugar en la interacción radiación-materia y materia-radiación.

Es un tema que puede resultar interesante para el alumnado y no presenta excesiva dificultad, por lo que se puede proponer una lectura individual. Después los alumnos y alumnas responden a las preguntas propuestas. Como trabajo final, pueden buscar información en Internet sobre alguna aplicación concreta que les haya llamado la atención.

Preguntas y respuestas

1. Explicar cómo se pueden presentar los emisores radiactivos.
   Según sus aplicaciones, los emisores de radiaciones ionizantes se pueden presentar como:

   Isótopos radiactivos encapsulados (fuente radiactiva encapsulada). Isótopos encerrados en cápsulas selladas de materiales resistentes o aquellas en las que el material radiactivo se encuentra sólidamente incorporado en materiales sólidos inactivos protegidos contra toda fuga. De esta cápsula solo emergerá la radiación ionizante emitida por el isótopo radiactivo que sea capaz de atravesar la mencionada cápsula.

   Isótopos radiactivos no encapsulados (fuente radiactiva no encapsulada). Isótopos en forma líquida, sólida o gaseosa, contenidos en recipientes cerrados, pero no sellados.

   Equipos generadores de rayos X o equipos aceleradores de partículas.

2. ¿Qué efectos produce la interacción de las radiaciones ionizantes sobre la materia?
   La radiación al interaccionar con la materia experimenta fenómenos de absorción y dispersión que suponen la pérdida total o parcial de su energía. Midiendo la radiación transmitida (con un detector de radiación) podemos obtener información sobre la materia o la cantidad de materia que ha atravesado. Esto es muy útil para medir, por ejemplo, el espesor y densidad.

3. ¿Qué le ocurre a la radiación cuando atraviesa la materia?
   Puede sufrir atenuación o cambio de dirección en función de la materia que atraviesa. La respuesta está relacionada con las características de la radiación (tipo, energía y cantidad) y las de la materia (densidad y su espesor).

4. ¿Qué industrias de control de procesos podrían utilizar fuentes radiactivas?
   Se pueden utilizar en equipos de medida de densidad y humedad de suelos, también en irradiadores para esterilización, para cambiar propiedades de la materia.

5. Citar tres aplicaciones de equipos generadores de rayos X fuera del campo médico.
   Para el radiografiado de obras de arte, para los controles de calidad de piezas en la industria o para la inspección de bultos.

6. ¿Qué es un radiotrazador? ¿Para qué lo podrías utilizar?
   Isótopos radiactivos incorporados a un material para seguir su curso o su comportamiento mediante la detección de las radiaciones ionizantes que producen estos isótopos. Estas técnicas se encuentran ampliamente difundidas en la industria, en la investigación y en la agricultura. Permiten realizar estudios de dispersión de efluentes industriales, localizar fugas en presas y canalizaciones, comprobar la absorción de nutrientes en las plantas o el grado de biodegradación de insecticidas.

7. ¿En qué consiste la técnica del insecto estéril (TIE)?
   Para el control de plagas. Consiste en exponer individuos machos criados en laboratorio a dosis de radiación ionizante apropiadas para esterilizarlos. Estos al ser liberados se aparean con las hembras sin producir descendencia. La liberación repetida de estos machos ha conseguido reducir o controlar las plagas en determinadas áreas geográficas.

8. ¿Para qué se puede utilizar el carbono-14?
   Se usa para datar la edad de diferentes objetos. El carbono-14 se forma en las partes altas de la atmósfera como producto del choque de neutrones procedentes de radiaciones cósmicas sobre átomos de nitrógeno. Por tanto, está presente en la atmósfera y los seres vivos contienen en su organismo el mismo número de átomos de ^{14}C que hay en la atmósfera.

   Cuando el ser vivo muere ya no incorpora más átomos de carbono-14, y empieza a desintegrarse transformándose en nitrógeno-14. Como se sabe que el periodo de semidesintegración del carbono-14 es 5730 años (tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los átomos de una muestra inicial), conociendo la cantidad de carbono-14 que existe en el organismo y la que se ha desintegrado, se puede calcular el tiempo que ha pasado.

UNIDAD 5. OTRAS APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo de la industria, en la investigación, en el sector agroalimentario o en el de seguridad son muchas y muy variadas. En esta unidad se presentarán algunas de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en los distintos sectores.

La incorporación de las radiaciones ionizantes en las aplicaciones industriales comienza alrededor de 1950, casi en paralelo con el desarrollo de la tecnología nuclear.

La gran variedad de procesos físicos involucrados en los fenómenos de interacción de la radiación ionizante con la materia es la causa del elevado número de aplicaciones en el campo industrial.

Para sus distintas aplicaciones, los emisores de radiaciones ionizantes se pueden presentar como:

- Isótopos radiactivos encapsulados, que denominaremos fuente radiactiva encapsulada. Son isótopos encerrados en cápsulas selladas de materiales resistentes o aquellas en las que el material radiactivo se encuentra sólidamente incorporado en materiales sólidos inactivos protegidos contra toda fuga. De esta cápsula solo emergerá la radiación ionizante emitida por el isótopo radiactivo que sea capaz de atravesar la mencionada cápsula.

- Isótopos radiactivos no encapsulados, que denominaremos fuente radiactiva no encapsulada. Son isótopos en forma líquida, sólida o gaseosa, contenidos en recipientes cerrados, pero no sellados.

- Equipos generadores de rayos X o equipos aceleradores de partículas.

¿En qué se basan las aplicaciones de las radiaciones ionizantes?

La aplicación de las radiaciones ionizantes se basa en la interacción de la radiación con la materia y su comportamiento en ella. En cada colisión las radiaciones ionizantes ceden energía a la materia y ésta sufre modificaciones al absorber dicha energía. De acuerdo con estas características podríamos clasificar las aplicaciones en tres grupos:

- Aplicaciones basadas en la acción de la materia sobre la radiación. Se fundamentan en la diferente atenuación o cambio de dirección que experimenta la radiación incidente, en función de la materia que atraviesa. Se incluyen en este grupo aplicaciones como la gammagrafía o la radiografía industrial, la medida de espesores, de densidad, del grado de humedad, etc.

- Aplicaciones basadas en la acción de la radiación sobre la materia, debido a la acción bactericida de la radiación y a su acción ionizante. Se incluyen en este grupo aplicaciones bactericidas como la esterilización y en el de la acción ionizante, los detectores de humo, o los aparatos para eliminar electricidad estática.

- Aplicaciones basadas en el empleo de radiotrazadores. La técnica consiste en incorporar isótopos radiactivos a un material para seguir su curso o su comportamiento mediante la detección de las radiaciones ionizantes que producen estos isótopos. Estas técnicas se encuentran ampliamente difundidas en la industria, en la investigación y en la agricultura. Permiten realizar estudios de dispersión de efluentes industriales, localizar fugas en presas y canalizaciones, comprobar la absorción de nutrientes en las plantas, el grado de biodegradación de insecticidas y estudios de investigación científica *in vivo* e *in vitro.*

A continuación, se exponen algunas de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la industria, la agricultura y la investigación agrupados según los campos que figuran a continuación:

- Sistemas radiactivos de control y medida. Dependiendo del lugar donde se utilicen tenemos: equipos de control de proceso, situados en la línea de proceso de fabricación; equipos de sondeo y obra civil, que se utilizan *in situ* y equipos para análisis de muestras que se utilizan en laboratorio.

- Radiografía industrial para control de calidad. Se trata de una técnica de ensayos no destructivos (no es necesario destruir la pieza para estudiarla). Dentro de este campo de aplicación también se encuentra la inspección de equipos o bultos y paquetería, o la detección de explosivos. Se obtienen imágenes de las piezas o de las estructuras radiografiadas para ver su estado. Puede ser mediante equipos de rayos X o mediante fuentes de radiación en gammágrafos.

- Irradiación industrial mediante fuentes radiactivas encapsuladas o aceleradores. Se utilizan para esterilización de materiales, conservación de alimentos, calibración de equipos, modificación de las características de los materiales irradiados o generación de un efecto biológico en actividades de investigación científica *in vivo* e *in vitro*.

- Radiotrazadores, mencionados anteriormente.

- Otros usos, como productos de consumo: detectores de humo iónicos, datación con carbono-14, etc.

Equipos de control de procesos

La radiación al interaccionar con la materia experimenta fenómenos de absorción y dispersión que suponen la pérdida total o parcial de su energía. Midiendo la radiación transmitida (con un detector de radiación) podemos obtener información sobre la materia o la cantidad de materia que ha atravesado. Esto es muy útil para medir por ejemplo, el espesor y densidad de las hojas de papel, de láminas de plástico o de chapas de acero (figura 2.5.1). También se puede utilizar esta técnica para medir el nivel de llenado de botellas o de depósitos que contengan líquidos.



Figura 2.5.1. Equipos de control de procesos.

Equipos de uso en sondeos y obra civil

En distintas actuaciones dentro del campo de la obra civil, como por ejemplo, en la construcción de carreteras, con objeto de comprobar la compactación del suelo se necesita medir la densidad y humedad del terreno (figura 2.5.2). Para ello, se han diseñado equipos que incorporan en un solo instrumento fuentes radiactivas encapsuladas para medida de densidad (radiación gamma) y humedad (radiación neutrónica).



Figura 2.5.2.
Equipos de medida de densidad y humedad de suelos.

Equipos para análisis de muestras en laboratorio

En los laboratorios escolares o científicos se utilizan diversos equipos para analizar la composición y estructura de materiales. Entre las técnicas más avanzadas y precisas están la fluorescencia de rayos X (XRF) y la difracción de rayos X (XRD). Estas tecnologías permiten conocer tanto qué elementos componen una sustancia como cómo están organizados a nivel atómico o cristalino.

1. Fluorescencia de rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X es una técnica que permite identificar los elementos químicos presentes en una muestra. Para ello, la muestra se irradia con rayos X de alta energía. Los átomos de la muestra responden emitiendo su propia radiación característica, la cual es captada por el equipo y analizada. Esto permite obtener la composición elemental exacta.

Ejemplo de aplicación:
- Conocer qué metales contiene una aleación.
- Analizar pigmentos en obras de arte antiguas.
- Estudiar minerales y su composición.

Son equipos típicos los espectrómetros de fluorescencia de rayos X portátiles o de sobremesa.

2. Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X se utiliza para investigar la estructura cristalina de los materiales. Cuando un haz de rayos X incide sobre una sustancia cristalina, los átomos del cristal hacen que los rayos se dispersen en patrones específicos.

Analizando estos patrones se puede determinar cómo están ordenados los átomos dentro del material.

Ejemplo de aplicación:
- Conocer los minerales por su estructura.
- Estudiar materiales como cerámicas, metales o fármacos.
- Analizar la pureza cristalina de un compuesto.

Son equipos típicos los difractómetros de rayos X, usualmente de gran tamaño y ubicados en laboratorios especializados.

Equipos de radiografía industrial para control de calidad

También se usan las radiaciones ionizantes en el campo del control de calidad de componentes metálicos o soldaduras. Para ello se utilizan equipos de rayos X para radiografía industrial (figura 2.5.3) similares a los utilizados para la radiografía médica, aceleradores o equipos que incorporan fuentes de rayos gamma (gammágrafos para gammagrafía industrial, figura 2.5.4.

Se utilizan para buscar defectos en trabajos de soldadura y en las piezas de metal empleadas en la construcción de barcos, puentes, aviones, recipientes de presión, líneas de tuberías y otras estructuras en las que una rotura podría resultar muy peligrosa. Los rayos X son adecuados cuando las piezas son poco gruesas, pero para espesores mayores pueden utilizarse rayos X de mayor energía producidos por medio de aceleradores. Cuando el metal tiene más grosor se requieren fuentes de rayos gamma, cuyo poder de penetración es mayor.



Figura 2.5.3. Equipo de rayos X para radiografía industrial.



Figura 2.5.4. Gammágrafo.

Es una técnica que también se usa en el ámbito del arte o la arqueología para ver las diferentes capas de pintura en los lienzos de los cuadros, para ver el contenido de vasijas o de estatuas y esculturas y ver el estado de su estructura.

Equipos de irradiación industrial

La irradiación industrial tiene muchas aplicaciones prácticas, como:

- La esterilización de material quirúrgico, hilos de sutura, apósitos, vendas, jeringuillas, cosmética, plantas medicinales, infusiones, corchos, maderas, etc.

- Para el control de plagas se está utilizando en algunos países la técnica de los insectos estériles (TIE), que consiste en exponer individuos machos criados en laboratorio a dosis de radiación ionizante apropiadas para esterilizarlos. Estos al ser liberados se aparean con las hembras sin producir descendencia. La liberación repetida de estos machos ha conseguido reducir o controlar las plagas en determinadas áreas geográficas.

- Mejorar las condiciones de conservación de los alimentos. En este caso la radiación proviene de una fuente exterior al alimento de tal manera que no existe contaminación del mismo con material radiactivo. Los alimentos no se convierten en radiactivos. Se produce una irradiación del material, no una contaminación.

- Tratamiento de materiales para mejorar ciertas propiedades, como por ejemplo en el proceso de vulcanización del caucho, en la producción de cristales coloreados, o en el tratamiento de ciertos plásticos para hacerlos más duraderos, fuertes y resistentes al fuego.

Otros usos

Los equipos de rayos X también se emplean en sistemas de seguridad, para inspeccionar bultos y detectar elementos potencialmente peligrosos, sin necesidad de abrirlos (figura 2.5.5). Estos aparatos se encuentran instalados en aeropuertos, aduanas, edificios oficiales, etc.



Figura 2.5.5. Equipos de rayos X para inspección de mercancías.

Otra técnica radiactiva utilizada en la investigación es la datación por carbono-14. El carbono tiene tres isótopos: carbono-12, carbono-13 y carbono-14. Este último es muy inestable y se estabiliza emitiendo partículas beta. El carbono-14 se forma en las partes altas de la atmósfera como producto del choque de neutrones procedentes de radiaciones cósmicas sobre átomos de nitrógeno. Por tanto, está presente en la atmósfera y los seres vivos contienen en su organismo el mismo número de átomos de carbono-14 que hay en la atmósfera.

Cuando el ser vivo muere ya no incorpora más átomos de carbono-14, y empieza a desintegrarse transformándose en nitrógeno-14. Como se sabe que el periodo de semidesintegración del carbono-14 es 5730 años (tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los átomos de una muestra inicial), conociendo la cantidad de carbono-14 que existe en el organismo y la que se ha desintegrado, se puede calcular el tiempo que ha pasado.

PUNTOS CLAVE

Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en industria, investigación, seguridad, agricultura, o alimentación son muchas y muy variadas. Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes se basan en cómo se modifica la materia al absorber la energía de la radiación o en cómo varía la energía de la radiación al atravesar la materia. Así tenemos:

- **Aplicaciones basadas en la acción de la materia sobre la radiación. La radiación incidente experimenta diferente atenuación o cambio de dirección en función de la materia que atraviesa. Se incluyen en este grupo aplicaciones como la medida de espesores, densidad, humedad, gramaje, nivel, gammagrafía y radiografía industrial.**

- **Aplicaciones basadas en la acción de las radiaciones sobre la materia debido a la acción ionizante y bactericida de la radiación ionizante. Se incluyen en este grupo aplicaciones como la esterilización de todo tipo de materiales, conservación de alimentos, tratamiento de materiales para mejorar sus propiedades, los detectores de humo o los equipos para eliminar la electricidad estática, etc.**

- **Aplicaciones basadas en el empleo de radiotrazadores, que son isótopos radiactivos que se incorporan a un material para seguir su curso o su comportamiento mediante la medida de las radiaciones ionizantes que emite, como por ejemplo el control de fugas en presas y canalizaciones, la mejora de riesgos, entre otros.**

Preguntas y respuestas

1. Explica cómo se pueden presentar los emisores radiactivos.

2. ¿Qué efectos produce la interacción de las radiaciones ionizantes sobre la materia?

3. ¿Qué le ocurre a la radiación cuando atraviesa la materia?

4. ¿Cómo funciona un equipo de control de procesos que utiliza fuentes radiactivas? ¿Qué industrias lo podrían utilizar?

5. Cita tres aplicaciones de equipos generadores de rayos X fuera del campo médico.

6. ¿Qué es un radiotrazador? ¿Para qué lo podrías utilizar?

7. ¿En qué consiste la técnica del insecto estéril (TIE)?

8. ¿Para qué se puede utilizar el carbono-14?

UNIDAD 6. OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Definirá los conceptos de fisión y fusión.
- Describirá el funcionamiento general de una central nuclear y conocerá sus partes fundamentales, asociando estas a la función que realizan.
- Distinguirá los dos tipos de centrales nucleares que operan en nuestro país, la central nucleares de agua en ebullición (BWR) y la de agua a presión (PWR), además conocerá su funcionamiento básico.
- Identificará los países de la Unión Europea con mayor producción de energía nuclear.
- Describirá el proceso de fusión y la obtención de energía.
- Nombrará el proyecto ITER.

Tiempo mínimo propuesto

2 horas.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad pueden consultarse los siguientes capítulos del suplemento técnico: *Estructura del átomo* (capítulo 2), *Ciclo del combustible nuclear y funcionamiento de las centrales nucleares. ITER* (capítulo 6) y *Residuos radiactivos: origen y gestión* (capítulo 8).

También es de interés la página web de ITER y las siguientes publicaciones de la serie divulgativa editada por el CSN: *El funcionamiento de las centrales nucleares*, *Utilización de energía nuclear para producir electricidad* y *Desmantelamiento y clausura de centrales nucleares*.

Sugerencias didácticas

En la primera parte de la unidad se trata la estructura atómica y se repasan conceptos químicos (número atómico, masa atómica, isótopo, desintegraciones…). La razón de incluir el análisis de la estructura del átomo es para

entender el concepto de inestabilidad y asociarlo al número de neutrones. Si se estima oportuno esta parte del tema puede resumirse brevemente, de forma que la unidad se imparta en una sola hora lectiva.

Lo más importante del tema comienza con la explicación de las partes de una central nuclear. A continuación, se explica el funcionamiento de los dos tipos de centrales nucleares que operan en España (de agua a presión y de agua en ebullición). Para explicar este punto se puede fotocopiar el texto explicativo de cada tipo de central y en el esquema correspondiente (gráfica) se pueden eliminar los nombres de cada parte y pedir a los alumnos/as que durante la explicación vayan identificándolas.

Después, se presenta una tabla con la potencia nuclear en la unión europea y finalmente, se termina el tema con la explicación de la energía de fusión y de los proyectos que actualmente se encuentran en marcha.

Los alumnos y alumnas leen el tema, y después, se puede comentar la tabla que aparece en la unidad. Se puede pedir a los alumnos/as que sobre un mapa de la Unión Europea señalen para cada país el porcentaje de energía eléctrica que es de origen nuclear, el número de reactores en funcionamiento, en construcción y clausurados.

Preguntas y respuestas

1. ¿Qué es la reacción nuclear de fisión? ¿y la de fusión?
   La reacción nuclear de fisión es aquella que tiene lugar en el núcleo del átomo. Esta reacción se produce cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos más ligeros, además de algunos subproductos, liberando una gran cantidad de energía en forma de radiación y partículas. Esta división también libera varios neutrones, que pueden provocar nuevas fisiones en otros núcleos cercanos, generando una reacción en cadena.

   La fusión nuclear es el proceso contrario a la fisión. Consiste en la unión de dos núcleos ligeros, como los isótopos de hidrógeno (deuterio y tritio), para formar un núcleo más pesado, como el helio, liberando enormes cantidades de energía. Este es el proceso que alimenta las estrellas, incluido el Sol.

2. ¿Cuáles son los componentes fundamentales de un reactor nuclear de fisión?
   Los componentes de un reactor nuclear son:
   - El combustible, formado por un material fisionable como puede ser un compuesto del uranio.
   - El moderador, sustancia que reduce la velocidad de los neutrones para aumentar la probabilidad de fisión. Se emplean como materiales moderadores el agua, agua pesada y grafito.

- El refrigerante, fluido que sirve para enfriar el combustible atrapando el calor que genera este. Suele ser agua aunque también se pueden utilizar sustancias gaseosas como el dióxido de carbono (CO2) o helio.
- El reflector, material que permite reducir el escape de neutrones de la zona del combustible, y por tanto disponer de más neutrones para continuar con la reacción en cadena. Los materiales empleados como reflectores son el agua, el grafito y el agua pesada.
- Las barras de control fabricadas con compuestos de cadmio o boro, que son materiales que actúan como absorbentes de neutrones evitando así que se produzcan nuevas fisiones.
- El blindaje, que evita el escape de la radiación gamma y de los neutrones del reactor. Los materiales usados como blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.

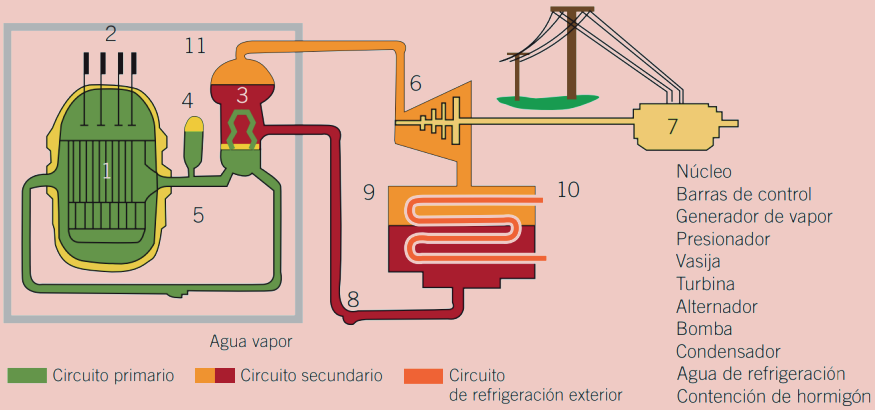
3. ¿Qué es el uranio natural? ¿Qué es el uranio enriquecido?
   Es el uranio tal como se extrae de la naturaleza, sin haber sido sometido a ningún proceso de modificación. El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: el 99,284 % es uranio-238, el 0,711 % es uranio-235 y el 0,0085 % es uranio-234. El U-235 es el isótopo fisionable, usado en reactores y armas nucleares. El uranio enriquecido es el uranio que ha sido tratado para aumentar la proporción de U-235 y poder ser utilizado como combustible de los reactores nucleares.

4. ¿Cuál es el combustible que se utiliza en las centrales nucleares españolas?
   En las centrales nucleares españolas de tipo PWR (reactor de agua a presión) y BWR (reactor de agua en ebullición) se utiliza como combustible uranio enriquecido en el isótopo U-235, con un grado de enriquecimiento que suele oscilar entre el 3 % y el 5 %. Este uranio se presenta en forma de pastillas cilíndricas de dióxido de uranio (UO_2), que se insertan en tubos metálicos de aleación de circonio (zircaloy) para formar las barras de combustible, las cuales se agrupan en elementos combustibles dentro del núcleo del reactor.

5. ¿Qué función tiene el moderador? ¿Y las barras de control?
   El moderador, sustancia que reduce la velocidad de los neutrones para aumentar la probabilidad de fisión. Se emplean como materiales moderadores el agua, agua pesada y grafito. Las barras de control fabricadas con compuestos de cadmio o boro, que son materiales que actúan como absorbentes de neutrones evitando así que se produzcan nuevas fisiones.

6. ¿Cuántos reactores nucleares hay actualmente funcionando en España y de qué tipo son?
   Actualmente, España cuenta con siete reactores nucleares en funcionamiento distribuidos en cinco centrales: Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II y Trillo, todas con reactores de agua a presión (PWR) y Cofrentes, que opera un reactor de agua en ebullición (BWR).

7. Esquema de una central nuclear de agua a presión. Correlacionar los distintos componentes con los números del esquema:



8. Buscar en la página web del OIEA el porcentaje de la energía nuclear que se destina a la producción de energía eléctrica en España. ¿cuál es el país de la Unión Europea que más depende de la energía nuclear para la producción de electricidad?

9. Averiguar qué es el Reactor Internacional Termonuclear de Fusión (ITER) y dónde se está construyendo.
   El proyecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor)* es una iniciativa internacional destinada a demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear como fuente de energía limpia, segura e inagotable. Su objetivo principal es generar 500 megavatios (MW) de potencia térmica a partir de una entrada de 50 MW, logrando así un rendimiento diez veces superior al de la energía suministrada.

   Ubicado en Saint-Paul-lez-Durance, en el sur de Francia, ITER es el resultado de la colaboración de 35 países, incluyendo a la Unión Europea, Estados Unidos, China, Rusia, Japón, India y Corea del Sur. Aunque inicialmente se preveía que el reactor comenzará a operar en 2025, diversos desafíos técnicos y logísticos han pospuesto el inicio de las operaciones hasta 2035.

UNIDAD 6. OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Obtención de energía de origen nuclear

La electricidad es fundamental en nuestras vidas. En nuestra vivienda la utilizamos para cocinar, para calentarnos, para iluminar, para hacer funcionar la lavadora, el ordenador, el televisor, entre otros. Dependemos tanto de la electricidad que cualquier interrupción en el suministro perturba nuestra vida.

Obtenemos electricidad de las centrales eléctricas. Algunas de ellas utilizan carbón, petróleo o gas. Para satisfacer la creciente demanda de energía y evitar una excesiva dependencia de los combustibles fósiles, muchos países utilizan la energía nuclear de fisión para obtener parte de la energía eléctrica que necesitan. En un futuro puede que también podamos obtener energía eléctrica de las reacciones nucleares de fusión.

Energía nuclear de fisión

El nombre de energía nuclear indica que la reacción de fisión tiene lugar en el núcleo del átomo. Esta reacción se produce cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños, además de algunos subproductos. En una central nuclear se producen reacciones nucleares de fisión en cadena, controlada y automantenida. Esta reacción de fisión libera enormes cantidades de energía en comparación con las reacciones químicas. Debemos mirar más de cerca la estructura del átomo antes de poder explicar esta reacción.

La estructura del átomo

Todo lo que nos rodea está compuesto por átomos, que representan los ladrillos con los que se construye cualquier material. Los griegos consideraron que el átomo era la parte más diminuta de la materia y le dieron el nombre que utilizamos hoy y que significa “una cosa que no puede dividirse”. Este concepto de átomo indivisible se aceptó hasta 1897, cuando Sir Joseph Thompson descubrió que podía descomponerse en partes más pequeñas. Consideró que el átomo es una especie de “pastel con pasas” donde las pasas serían los electrones.

En 1913, Neils Bohr y Walter Bethe sugirieron la existencia de un núcleo con protones y neutrones rodeado por electrones girando en órbitas. Hoy el concepto de órbita totalmente definida ha sido sustituido por una probabilidad. Según el modelo ondulatorio de Schrödinger, los electrones se encuentran en orbitales, que se definen como las regiones del espacio donde es más probable

encontrar el electrón. Aun así, en las explicaciones siguientes seguiremos el modelo de Bohr. En la figura 2.6.1 se representa el átomo de helio, con los protones de color rojo, los neutrones de color verde y girando alrededor de estos los electrones, de color amarillo.

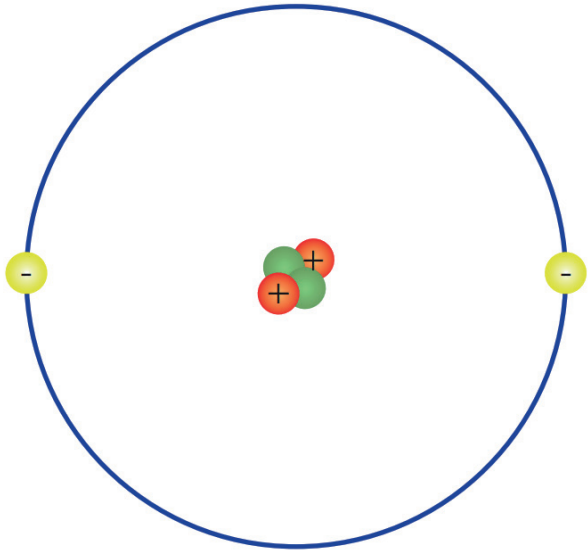


Figura 2.6.1.
Átomo de Helio.

Esta idea nos da una imagen muy útil del átomo. Así, los electrones son pequeñas partículas cargadas de electricidad. Cada electrón tiene una carga negativa y puede eliminarse de los átomos de algunos materiales con una simple frotación (se conoce como electricidad estática). El átomo en su estado normal es neutro y sus electrones deben estar equilibrados por una carga positiva en el núcleo. Esta carga la proporcionan los protones, pues cada uno neutraliza exactamente a un electrón y lo mantiene en su capa mediante la atracción entre las cargas eléctricas. El número de protones del átomo es el número atómico y se representa con el símbolo (Z). Por ejemplo, el hidrógeno (H) tiene un protón, su número atómico es Z=1.

Los protones y los neutrones son unas 2000 veces más pesados que un electrón y componen la masa del átomo. El número total de protones y neutrones es el número másico y se representa con el símbolo (A). Por ejemplo, el carbono-12 (C-12) tiene seis protones y seis neutrones, por tanto su número másico es A=12.

En resumen, podemos decir que:

- La masa atómica es el número de protones más neutrones.
- El número atómico es el número de protones.

Examinemos el oxígeno (figura 2.6.2), que es un átomo de mayor tamaño que el helio y tiene en su núcleo ocho protones (de carga positiva) y ocho neutrones.

Naturalmente, el oxígeno debe tener un número atómico (Z) igual a ocho, que equivale a los ocho protones que están compensados por ocho electrones (de carga negativa) para hacer neutro al átomo. Estos ocho electrones tienen que estar en capas alrededor del núcleo y entendemos que éstos están en dos capas diferentes, dos en una interior y seis en otra exterior. Los electrones del exterior son los que pueden eliminarse por ionización y son también los causantes de las propiedades químicas del elemento.

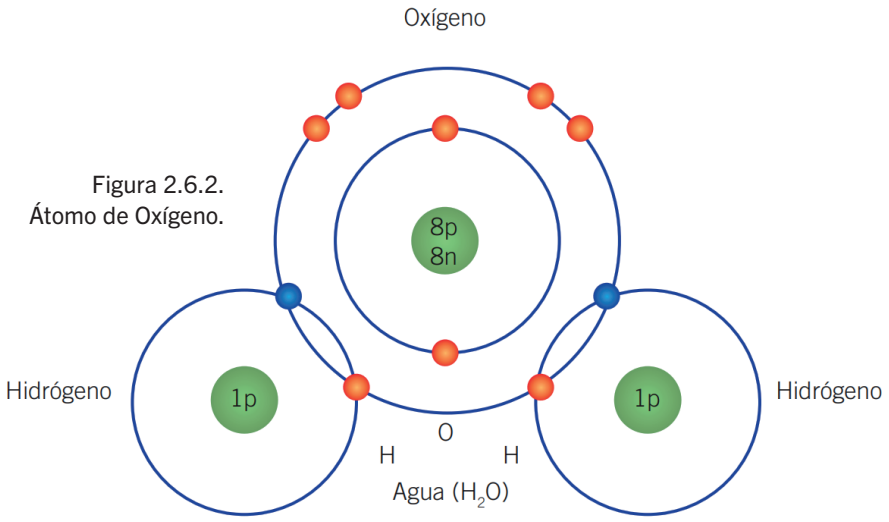


Figura 2.6.2.
Átomo de Oxígeno.

El agua es una molécula compuesta por dos elementos, hidrógeno y oxígeno que reaccionan juntos a través de sus electrones externos. El hidrógeno tiene un protón en el núcleo y un electrón en una capa, por lo que solo tienen un electrón exterior. La molécula de agua tiene un total de ocho electrones en la capa externa, que sabemos que constituye una estructura química muy fuerte y estable.

Volvamos al núcleo. ¿Cómo puede ser estable? Sabemos que las cargas opuestas se atraen, pero en el núcleo existen muchos protones juntos y podría esperarse que los protones se repelieran unos a otros. Eso es cierto, pero en el núcleo existen otras partículas que son los neutrones que actúan como un "adhesivo atómico" haciendo que el núcleo permanezca unido, mediante fuerzas nucleares.

Podría pensarse que el núcleo de hidrógeno, al tener solo un protón, no necesitaría ningún neutrón que actuara de enlace adhesivo, y sin embargo, hay otros dos tipos de átomos de hidrógeno que contienen neutrones: el hidrógeno-2, con un neutrón, al que llamarnos deuterio, y el hidrógeno-3, con dos neutrones, que se llama tritio. Estos tres tipos de hidrógeno son isótopos del hidrógeno (figura 2.6.3). Más adelante, veremos que el "adhesivo" no funciona muy bien en el núcleo del tritio.

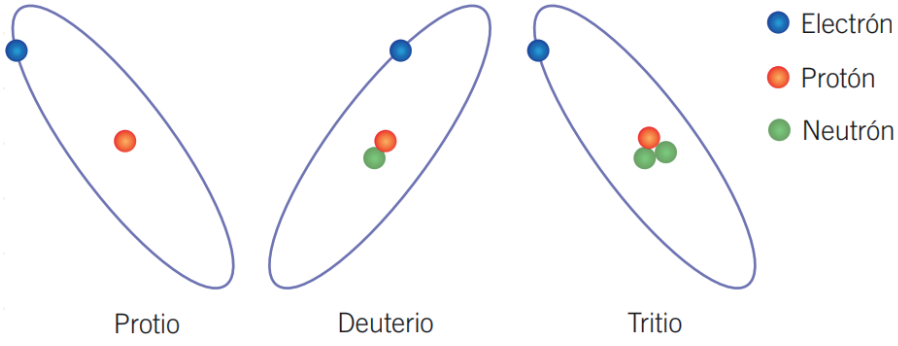


Figura 2.6.3. Los 3 isótopos del Hidrógeno.

Las propiedades químicas de los elementos de sus electrones de valencia que son aquellos ubicados en la capa externa del átomo.

Los elementos pueden disponerse en una tabla periódica (figura 2.6.4), donde las columnas verticales se conocen como grupos. Todos los elementos que pertenecen a un grupo tienen la misma valencia atómica, y por ello, tienen características o propiedades similares entre sí. Las filas horizontales se llaman periodos. Los elementos que componen una misma fila tienen propiedades diferentes pero masas similares, todos los elementos de un periodo tienen el mismo número de orbitales.

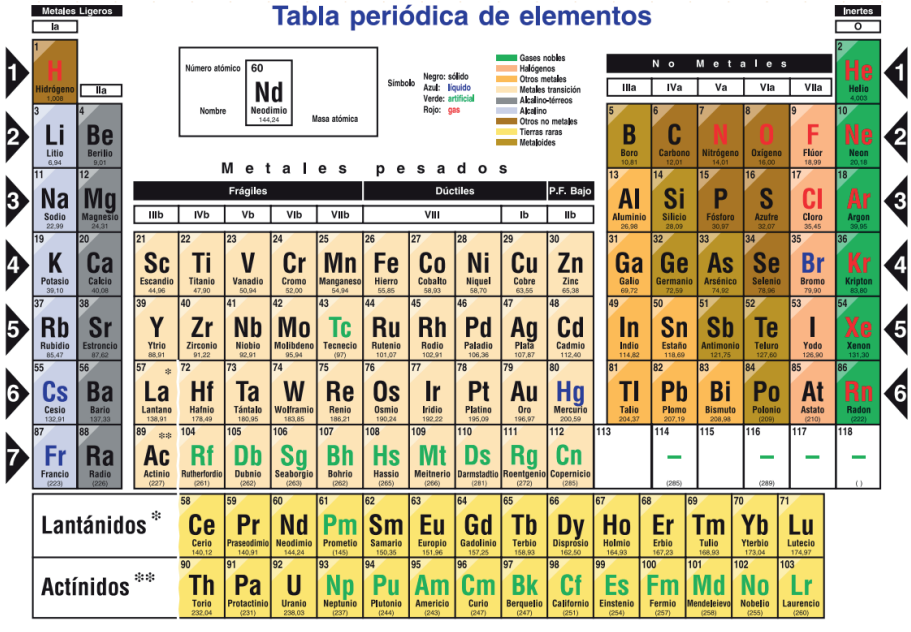


Figura 2.6.4. Tabla periódica de elementos.

La capacidad “adhesiva” atómica del neutrón es una idea simplificada para explicar cómo se mantiene la cohesión en un núcleo. De hecho, hay muchos tipos

de átomos en los que el núcleo no está perfectamente "pegado" y uno de ellos es el tritio (H-3). Parece que un buen "adhesivo" debe tener las proporciones correctas de neutrones y protones y que la proporción puede ser demasiado elevada o demasiado baja para un átomo concreto.

La proporción es demasiado alta en el tritio y el núcleo tiende a desintegrarse y a liberar el exceso de neutrones. Entonces el tritio emite un electrón del núcleo. Uno de los dos neutrones se ha hecho positivo al perder un electrón y se ha convertido en un protón. ¡El tritio se ha transformado en helio, que tiene un número diferente de protones en el núcleo! El electrón emitido por el neutrón se llama partícula beta.

Cada vez que el tritio se desintegra y se transforma en el átomo de helio, emite una partícula beta. Este es uno de los cuatro tipos principales de radiación ionizante que emite el núcleo para hacerse más estable. En la unidad dos se han descrito los tipos de radiación ionizante emitidos por un isótopo radiactivo.

La estabilidad o inestabilidad de los núcleos está ligada a su estructura. Para un valor determinado del número atómico, existe un cierto intervalo del número de neutrones, que configuran núcleos estables, llamado banda isotópica de estabilidad nuclear. Se conoce como isótopos a los átomos que tienen igual número atómico (número de protones en el núcleo) pero diferente número másico (suma del número de neutrones y el de protones en el núcleo), por lo tanto, difieren en el número de neutrones.

Componentes de un reactor nuclear

Los componentes fundamentales de un reactor nuclear son los siguientes:

- El combustible, formado por un material fisionable, generalmente se utiliza un compuesto de uranio. El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: el 99,284 % es uranio-238, el 0,711 % es uranio-235 y el 0,0085 % es uranio-234.

El uranio-235 es inestable y, por tanto, radiactivo. En esta desintegración se emiten partículas alfa. No obstante, los descubrimientos efectuados en 1939 demostraron que, si se añade un neutrón más al núcleo de uranio-235, este se vuelve extremadamente inestable y se desintegra violentamente.

Esta reacción, que se desencadena bombardeando el uranio-235 con neutrones, es la famosa reacción de fisión. Ahora sabemos que esta desintegración del uranio-235 provoca la división del núcleo en dos fragmentos aproximadamente iguales, cada uno de los cuales es un elemento más ligero. Durante la reacción se libera una gran cantidad de energía.

Podéis ver que en la reacción se han producido varios neutrones adicionales. Si uno de estos neutrones es absorbido por otro núcleo de uranio-235, el proceso de fisión puede continuar como reacción en cadena (figura 2.6.5). De esta forma, una reacción conduce a otra y este proceso constante de fisión es la clave del funcionamiento de un reactor nuclear. La mayoría de los productos procedentes de la fisión del uranio-235 son radiactivos y constituyen los residuos radiactivos de alta actividad producidos por el consumo de uranio en un reactor.

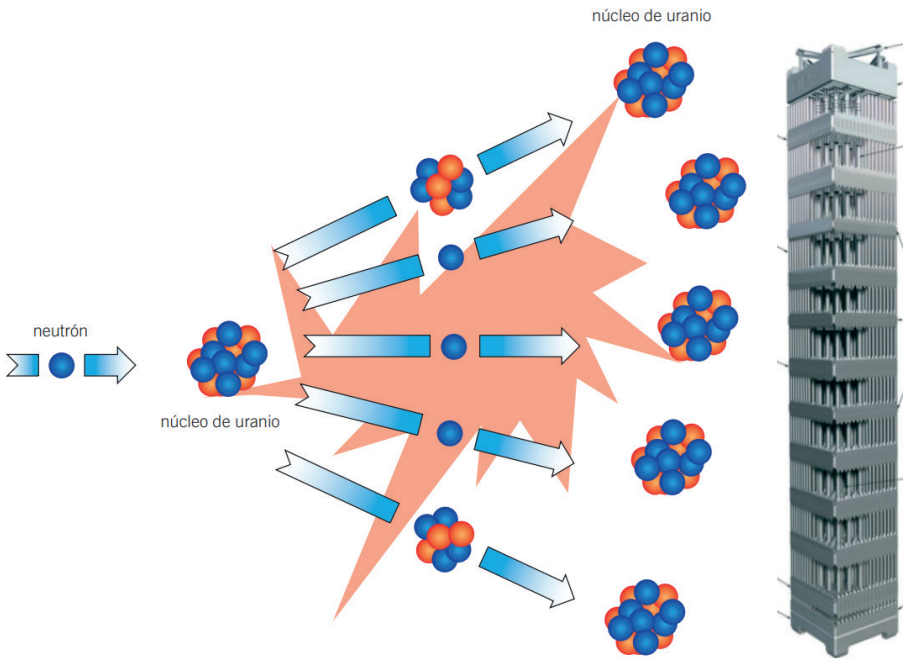


Figura 2.6.5. Reacción en cadena.

Figura 2.6.6. Elemento combustible (fuente: ENUSA).

El uranio enriquecido se presenta en forma de pastillas cerámicas que se colocan en el interior de una "vaina" formando así la varilla de combustible. Las varillas se colocan en un armazón junto con otros elementos auxiliares para formar un elemento de combustible (figura 2.6.6).

- El moderador. Los neutrones liberados en la reacción de fisión tienen una gran cantidad de energía, de forma que pueden escapar fácilmente del uranio. El moderador, es la sustancia que permite que los neutrones adquieran una velocidad adecuada para que puedan producir una nueva reacción de fisión. Se emplean como materiales moderadores el agua, agua pesada y grafito.

- El refrigerante. El calor generado en un reactor debe eliminarse de forma adecuada, no solo para suministrar vapor de agua a los turbogeneradores, sino también para mantener el combustible a una temperatura óptima. El combustible se refrigera mediante el contacto con un fluido que atrapa su calor. Este fluido se llama refrigerante y generalmente es un líquido como el agua, aunque

puede ser también un gas, como el dióxido de carbono ($C0_2$) o el helio. Cuando se emplea agua, esta puede desempeñar las funciones tanto de moderador como de refrigerante a la vez.

- El reflector, que permite reducir el escape de neutrones de la zona del combustible, y por tanto disponer de más neutrones para continuar con la reacción en cadena. Los materiales usados como reflectores son el agua, el grafito y el agua pesada.

- Las barras de control. En un reactor, el número total de neutrones debe estar controlado para que la reacción continúe a un ritmo estable o se pare. Esto se consigue utilizando absorbentes de neutrones o barras de control que lo que hacen es capturar neutrones del medio evitando así que se produzcan nuevas fisiones.

Los elementos de control tienen formas de barras, aunque también pueden encontrarse diluidos en el refrigerante. Las barras de control se fabrican con compuestos de cadmio o boro.

- El blindaje, que evita el escape de la radiación gamma y de los neutrones del reactor. Los materiales usados como blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.

El primer reactor nuclear construido por Enrico Fermi empezó a operar en 1942, pero no fue el primero en la tierra, puesto que se cree que hace unos 1700 millones de años en un depósito de uranio en África (Oklo, Gabón) se produjo espontáneamente una reacción de fisión en cadena.

A continuación, describiremos más detalladamente los dos tipos de centrales nucleares más comunes y que son las que se encuentran en operación en nuestro país.

Centrales nucleares de agua a presión (PWR)

En la figura 2.6.7 se muestra esquemáticamente una central nuclear de agua a presión (PWR). El núcleo del reactor, formado por los elementos combustibles, está contenido en una cuba de acero (vasija del reactor) por la que circula agua bajo presión. Las barras de control están colocadas en la parte superior de la tapa de la vasija del reactor y se insertan (penetran) en el núcleo por acción de la gravedad.

El agua circula hacia el núcleo impulsada por unas bombas y se mantiene a la presión adecuada gracias a un presionador. El circuito recorrido por el agua que atraviesa el núcleo del reactor se llama circuito primario. Se trata de un circuito cerrado cuya agua pasa, periódicamente, a través de un sistema de purificación. El agua de este circuito pasa por el interior de unos tubos en forma de U invertida, de los generadores de vapor.

Por el exterior de los tubos del generador de vapor, sin mezclarse con el agua del circuito primario, circula el agua del circuito secundario, que se calienta gracias al calor cedido por el agua del circuito primario. Este calor hace que el agua del circuito secundario se convierta en vapor en la parte superior de los generadores de vapor. El vapor obtenido se expande en la turbina haciéndola girar (energía mecánica) y moviendo el alternador donde se produce la electricidad que se envía al parque de transformación y a la red eléctrica.

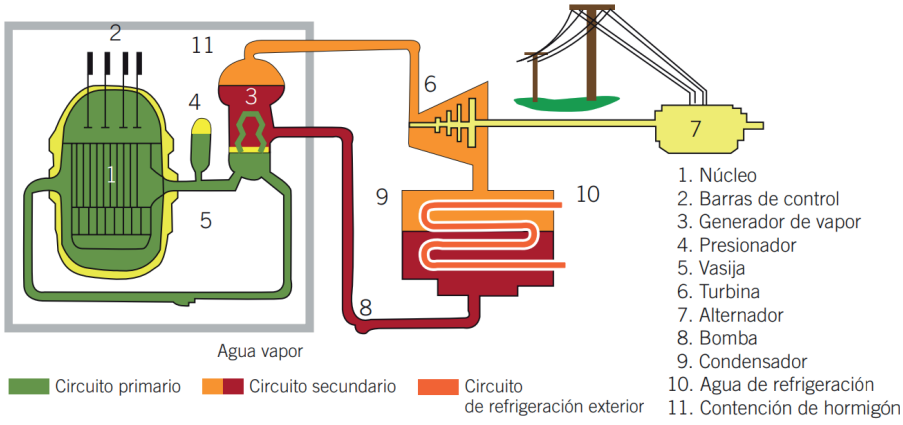


Figura 2.6.7. Esquema de funcionamiento de una central nuclear (PWR).

Como en toda central térmica, hay que condensar el vapor que ha pasado por la turbina. La condensación se hace a través de un circuito de refrigeración exterior que utiliza un gran caudal de agua procedente de un río, un pantano o el mar. El agua del circuito de refrigeración circula por el interior de los tubos del condensador tomando el calor del vapor y lo transporta hasta el mar, río o torres de refrigeración (en el caso de sistemas de circulación cerrados). El vapor que circula por el exterior de los tubos del condensador se condensa al enfriarse y es enviado de nuevo al generador de vapor para volver a convertirse en vapor.

Las presiones en el condensador son mayores por la parte interior del tubo donde circula agua de río o mar que por el exterior, circuito secundario. Así, en caso de producirse una fisura en la pared del tubo sería el agua de río el que entrara en el condensador y no el vapor de la central el que saliera fuera.

El circuito primario funciona dentro de un edificio perfectamente estanco. Este edificio se denomina “edificio de contención” y dispone del equipamiento necesario para reducir la dispersión de contaminación radiactiva si ocurre un accidente, es decir, que hay varias barreras que evitan el escape de los productos de fisión.

Centrales nucleares de agua a ebullición (BWR)

En la figura 2.6.8 se muestra esquemáticamente una central nuclear de agua en ebullición. El reactor de agua en ebullición es muy parecido al reactor de agua a presión aunque en este caso el circuito secundario ha desaparecido ya que el agua se hace hervir directamente en la propia vasija del reactor, es decir, en contacto directo con los elementos combustibles. El agua interviene, además, como moderador de la reacción nuclear.

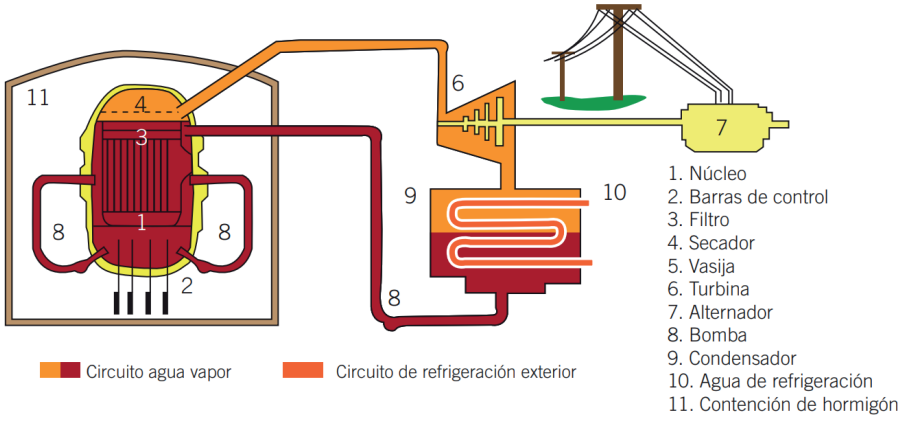


Figura 2.6.8. Esquema de funcionamiento de una central nuclear (BWR).

La ebullición en el interior de la vasija, debido al calor desprendido por el núcleo del reactor, produce vapor saturado que pasa a través de los separadores de humedad y los secadores contenidos en la tapa de la vasija. Este vapor seco, se envía a la turbina haciéndola girar. La turbina está acoplada al alternador.

El vapor a la salida de la turbina pasa al condensador. Una vez que el agua que sale del condensador ha sido calentada a la temperatura adecuada, se bombea de nuevo a la vasija del reactor.

Aproximadamente una tercera parte del agua de refrigeración del núcleo se deriva continuamente fuera de la vasija a través de los bucles de recirculación (en el esquema corresponden a dónde se sitúan las bombas (número 8), y se hace volver a la vasija a través de las bombas de inyección internas situadas dentro de la vasija para aumentar el caudal del refrigerante y contribuir a la regulación de la potencia del reactor.

Las barras de control están situadas en la parte inferior de la vasija y se inyectan en su interior mediante un sistema hidráulico accionado por el propio refrigerante.

La potencia nuclear en el mundo

La siguiente tabla (2.6.1) muestra el uso de la energía nuclear para la producción de electricidad a nivel mundial (hasta el año 2022). Resume los reactores en operación, en construcción, la electricidad nuclear suministrada y la experiencia operacional.

Tabla 2.6.1. Uso de Energía Nuclear para producción de electricidad en el mundo (datos recopilados del PRIS de la página web del OIEA).

País	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2022		Experiencia operacional total hasta 2022	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidades	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
Alemania	3	4 055			31,9	5,8	834	8
Argentina	3	1 641	1	25	7,5	5,4	97	2
Armenia	1	416			2,6	31,0	55	3
Bangladesh			2	2 160				
Belarús	1	1 110	1	1 110	4,4	11,9	2	2
Bélgica	6	4 936			41,7	46,4	324	4
Brasil	2	1 884	1	1 340	13,7	2,5	63	3
Bulgaria	2	2 006			15,8	32,5	173	3
Canadá	19	13 624			81,7	12,9	903	0
China	54	52 181	20	20 284	395,4	5,0	513	2
Corea, República de	25	24 489	3	4 020	167,5	30,4	644	9
Egipto			2	2 200				
Emiratos Árabes Unidos	3	4 011	1	1 310	19,3	6,8	4	0
Eslovaquia	4	1 868	2	880	14,8	59,2	184	7
Eslovenia	1	688			5,3	42,8	41	3
España	7	7 123			56,2	20,3	368	2
Estados Unidos de América	92	94 718	2	2 234	772,2	18,2	4 825	9
Federación de Rusia	37	27 727	3	2 700	209,5	19,6	1 447	7
Finlandia	5	4 394			24,2	35,0	176	2
Francia	56	61 370	1	1 630	282,1	62,6	2 449	0
Hungría	4	1 916			15,0	47,0	150	2
India	19	6 290	8	6 028	42	3,1	594	11
Irán, República Islámica del	1	915	1	974	6,0	1,7	11	4
Japón	10	9 486	2	2 653	51,9	6,1	2 020	6
México	2	1 552			10,5	4,5	61	11
Países Bajos	1	482			3,9	3,3	78	0
Pakistán	6	3 262			22,2	16,2	98	9
Reino Unido	9	5 883	2	3 260	43,6	14,2	1 658	9
República Checa	6	3 934			29,3	36,7	188	10
Rumania	2	1 300			10,2	19,3	41	11
Sudáfrica	2	1 854			10,1	4,9	76	3
Suecia	6	6 937			50,0	29,5	486	0
Suiza	4	2 973			23,2	36,4	236	11
Türkiye			4	4 456				
Ucrania [c]	15	13 107	2	2 070	N.D.	N.D.	563	6
A nivel mundial [b,c]	**438 [d]**	**393 823 [d]**	**58**	**59 334**	**2 486,6**	**N.D.**	**19 764**	**11**

Gestión de residuos radiactivos en las centrales nucleares

En las centrales nucleares españolas se generan distintos tipos de residuos radiactivos que requieren una gestión especializada, coordinada por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa). El Consejo de Seguridad Nuclear

(CSN) es el organismo regulador encargado de controlar las actividades relacionadas con la gestión de residuos radiactivos en España.

Los residuos radiactivos generados en las centrales nucleares españolas se clasifican principalmente en dos grandes grupos: residuos de baja y media actividad (RBMA) y residuos de alta actividad (RAA). Los RBMA incluyen herramientas, ropa contaminada, resinas y componentes metálicos, representando alrededor del 95 % del volumen total de residuos, pero con baja radiactividad. Se almacenan de forma definitiva en el centro de El Cabril.

Los RAA, que incluyen el combustible nuclear gastado y otros materiales altamente radiactivos, representan solo el 5 % del volumen, pero concentran más del 95 % de la radiactividad total. Estos se almacenan temporalmente en piscinas para su enfriamiento y posteriormente en Almacenes Temporales Individualizados (ATI) ubicados en las propias centrales. La estrategia a seguir a largo plazo con este tipo de residuos, consistirá en construir un Almacén Geológico Profundo (AGP) para garantizar su aislamiento seguro. (Enresa).

La energía nuclear de fusión

La fusión nuclear es la reacción en la que dos núcleos muy ligeros se unen para formar un núcleo más pesado y estable. En este proceso se libera gran cantidad de energía. Esta es la energía que se produce en las estrellas (figura 2.6.9).

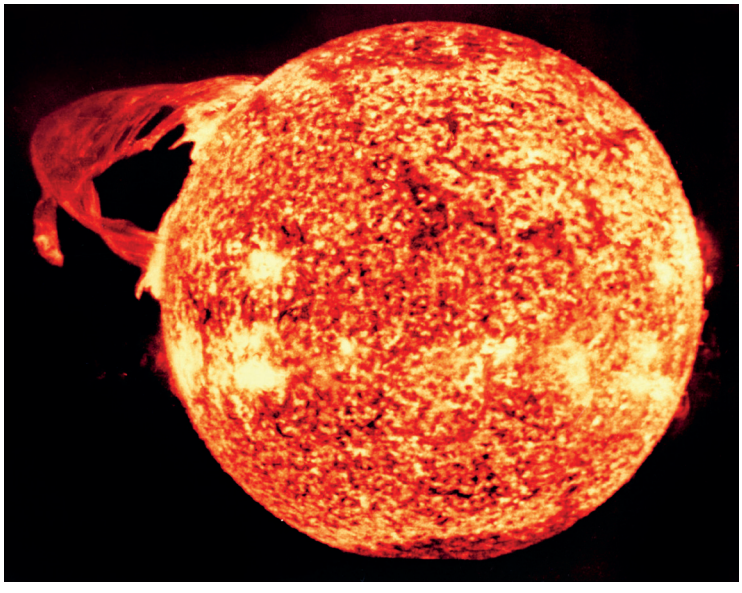


Figura 2.6.9.
La fusión. la energía de las estrellas).

Para que tenga lugar la fusión, los núcleos cargados positivamente deben aproximarse venciendo las fuerzas electrostáticas de repulsión. La energía cinética necesaria para que los núcleos que reaccionan venzan la repulsión se puede suministrar en forma de energía térmica o utilizando un acelerador de partículas.

El mayor problema con que cuenta esta fuente de energía es la enorme cantidad de energía requerida para iniciar la reacción y para mantenerla durante un tiempo. Actualmente se está experimentado con dos formas de conseguir la energía nuclear de fusión:

- El confinamiento inercial: consiste en contener la fusión mediante el empuje de partículas o de rayos láser proyectados contra una partícula de combustible, provocando la ignición instantánea. Se ha comprobado que esta técnica no es viable.

- El confinamiento magnético: consiste en contener el material a fusionar en un campo magnético mientras se le hace alcanzar la temperatura y presión necesarias.

Actualmente, se ha producido energía de fusión nuclear en dos proyectos distintos, el JET (*Joint European Torus*) de la Unión Europea en Oxfordshire y el TFTR (*Toroidal Fusion Thermonuclear Reactor*) en Princeton. Los dos son dispositivos de fusión por confinamiento magnético. En 1991, en el JET se obtuvo un pico de 1,7 MW y en 1997 de 16,1 MW a costa de utilizar 25,7 MW para calentar el plasma, mostrando así su inviabilidad.

El siguiente paso es el construir un reactor para producir energía eléctrica a partir de la fusión de núcleos atómicos, replicando el proceso que ocurre en el interior del Sol. Este reactor es el ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), un reactor experimental que actualmente se encuentra en la fase final de construcción en Cadarache (Francia). Se prevé producir plasma en 2026-2027. Concebido para producir diez veces más energía de la necesaria para inducir la fusión, se basa en el modelo Tokamak (figura 2.6.10).

Con una altura total de 30 m y una anchura de 40, la vasija del ITER, en forma de donut (toroide), tendrá un radio de 6,2 m y una capacidad de generación de 500 MW, el equivalente a la producción de una planta eléctrica de tamaño medio. El sistema de confinamiento magnético, fabricado con materiales superconductores, inducirá una corriente eléctrica en el plasma que permitirá mantenerlo en condiciones estables. El experimento estrella se prevé para la década de 2030 y será la fusión con deuterio y tritio. En este experimento se buscará alcanzar un Q ≥10, es decir, generar 10 veces más energía de la que se inyecta.

UNIDAD 6

FICHA DEL ALUMNADO

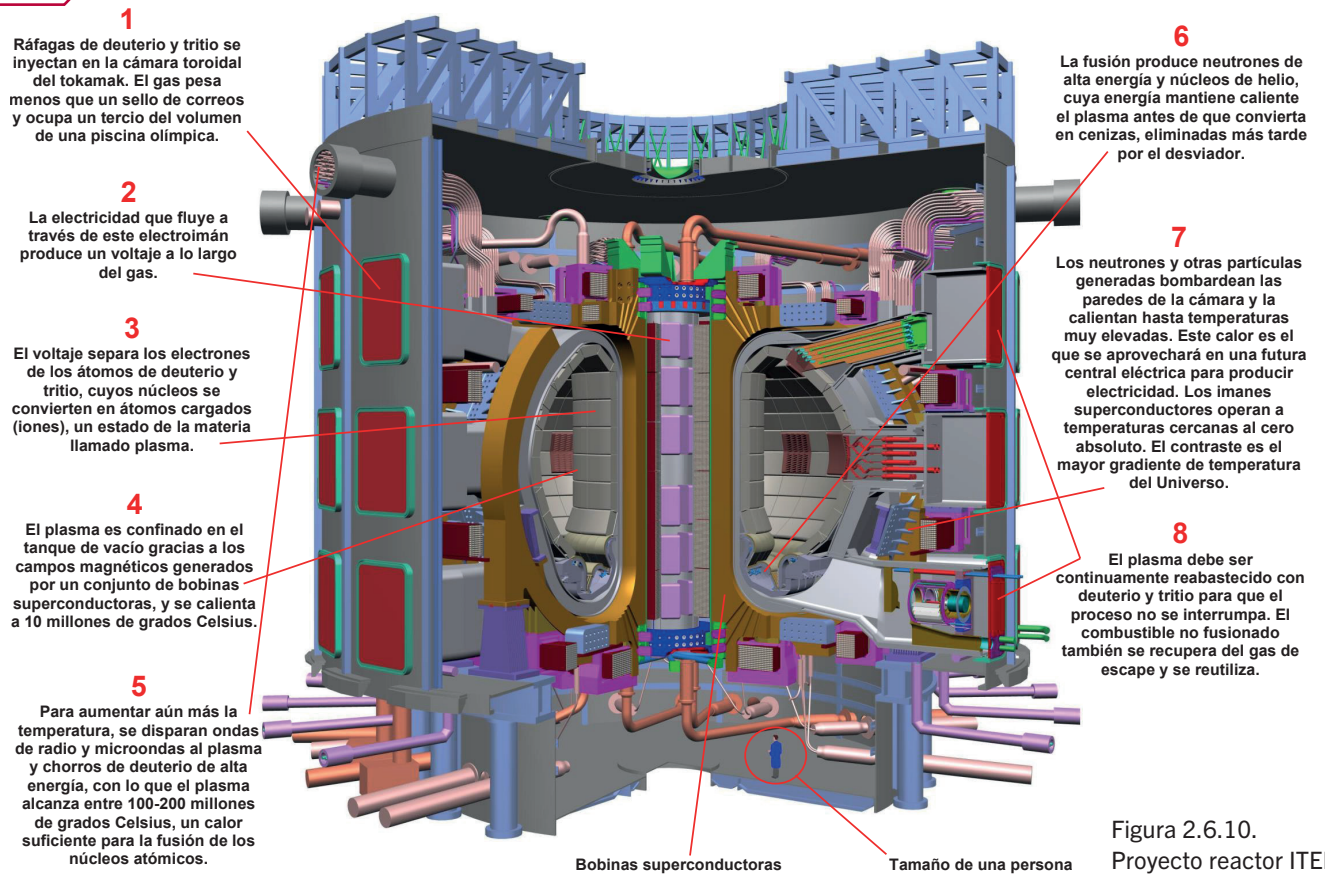


Figura 2.6.10.
Proyecto reactor ITER.

La principal ventaja que presenta este proyecto es que los combustibles primarios son abundantes, no radiactivos y repartidos geográficamente de manera uniforme. El deuterio se obtiene del agua, y el tritio del litio, un elemento bastante abundante. En teoría, de 500 litros de agua y 30 gramos de litio se pueden obtener 10 gramos de deuterio y 15 gramos de tritio, que bastan para satisfacer las necesidades energéticas de cualquier persona de un país desarrollado durante toda su vida.

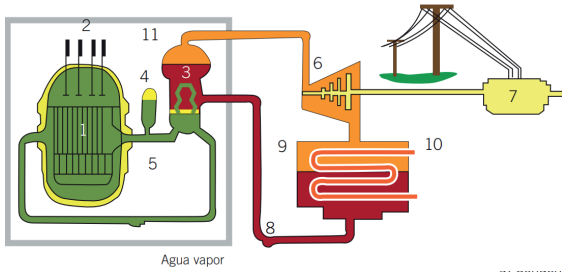
Las centrales nucleares de fusión también producen residuos radiactivos, aunque en menor cantidad que las centrales nucleares de fisión. Las futuras centrales nucleares de fusión generarán residuos radiactivos muy diferentes a los de la fisión, principalmente materiales estructurales activados por los neutrones de alta energía, los cuales tendrán una radiactividad de corta a media duración (décadas o pocos siglos). También se manejará tritio, un isótopo levemente radiactivo, pero en circuitos cerrados.

PUNTOS CLAVE

- **El átomo puede describirse como un conjunto de capas de electrones y un núcleo en el que, gracias a las fuerzas nucleares, coexisten protones y neutrones.**
- **El reactor de una central nuclear contiene el combustible (de un material fisible), un moderador, un absorbente de neutrones (barras de control) y un refrigerante que elimina del reactor el calor obtenido en el proceso de fisión.**
- **En España, las centrales nucleares pueden ser de dos tipos: de agua a presión o de ebullición. Aproximadamente el 33 % de la electricidad que se suministra en la Unión Europea proviene de centrales nucleares, y las expectativas son de crecimiento. En un futuro puede que podamos obtener electricidad de la fusión nuclear.**

Preguntas, tareas y respuestas

1. ¿Qué es la reacción nuclear de fisión? ¿Y la de fusión?
2. ¿Cuáles son los componentes fundamentales de un reactor nuclear de fisión?
3. ¿Qué es el uranio natural? ¿Qué es el uranio enriquecido?
4. ¿Cuál es el combustible que se utiliza en una central nuclear en España?
5. ¿Qué función tiene el moderador? ¿Y las barras de control?
6. ¿Cuántos reactores nucleares hay actualmente funcionando en España y de qué tipo son?
7. Esquema de una central nuclear de agua a presión. Correlaciona los distintos componentes con los números del esquema:



Núcleo	Alternador	Edificio de contención
Presionador	Barras de control	Agua de refrigeración
Generador de vapor	Turbina	Condensador
Bomba de recirculación	Vasija del reactor	

8. Busca en la página web del OIEA el porcentaje de la energía nuclear que se destina a la producción de energía eléctrica en España. ¿Cuál es el país de la Unión Europea que más depende de la energía nuclear para la producción de electricidad?
9. Averigua qué es el Reactor Internacional Termonuclear de Fusión y dónde se está construyendo.

UNIDAD 7. LOS RESIDUOS RADIACTIVOS

Objetivos

Al final de la unidad, el alumnado:

- Definirá que son los residuos radiactivos.
- Identificará el origen de los residuos radiactivos.
- Clasificará los residuos según su radiactividad, y asociará la instalación de almacenamiento adecuada a cada tipo de residuo.
- Valorará la función de la instalación de El Cabril.
- Identificará Enresa como la empresa encargada de la gestión de los residuos radiactivos y que el CSN se ocupa de controlar la seguridad en esta gestión.

Tiempo mínimo

1 hora.

Apoyo documental

Para una información más detallada sobre los temas tratados en esta unidad puede consultarse el capítulo ocho del suplemento técnico: *Los residuos radiactivos: origen y gestión.*

Sugerencias didácticas

En esta unidad se analiza la gestión de los residuos radiactivos. Se comienza el tema definiendo y clasificando los residuos radiactivos. Después se enumeran los tipos de instalaciones para el almacenamiento de los residuos, dependiendo de su radiactividad, explicando que en España los residuos de muy baja, baja y media radiactividad se almacenan en El Cabril. Para terminar, se especifica cuál es la empresa encargada de la gestión de residuos (Enresa) y el organismo que controla seguridad de esta gestión (CSN).

Esta unidad no presenta ninguna dificultad, con lo cual los alumnos y alumnas pueden leer individualmente el tema y contestar a las preguntas propuestas.

Preguntas, tareas y respuestas

1. ¿Qué es un residuo radiactivo?
   Un residuo radiactivo es cualquier material para el cual no está previsto ningún uso, que contiene isótopos radiactivos en cantidades superiores a determinados valores establecidos por las autoridades competentes.

2. ¿Todos los residuos radiactivos son iguales?
   No, pueden clasificarse en diferentes categorías teniendo en cuenta, por ejemplo, su nivel de radiactividad, si es muy baja, baja, media o alta actividad. También se usa una clasificación en función del periodo de semidesintegración o vida media, es decir, el tiempo que los radionucleidos tardan en perder su capacidad de emitir radiación (encuadrándose en residuos de vida corta o vida larga). Por otra parte, es muy importante, en función del o de los isótopos que contiene, la toxicidad qué producen en el cuerpo humano si se incorporan, y desde el punto de vista de la manipulación, es importante si se presentan en forma líquida, sólida, etc.

3. ¿Dónde se producen los residuos radiactivos?
   Se producen en aquellas aplicaciones en las que está presente la radiactividad, como la operación y el desmantelamiento de las centrales nucleares de producción de energía, y otras actividades como investigación, medicina e industria.

4. ¿Qué significa gestión segura de los residuos radiactivos?
   Una gestión segura de los residuos es aquella estrategia y procedimientos que tratan de garantizar la protección de las personas y el medio ambiente contra toda emisión o diseminación de las materias radiactivas que contienen, tan a largo plazo como sea necesario por las características de los residuos.

5. ¿Quién lleva a cabo la gestión de los residuos radiactivos en España? ¿Y el control?
   La gestión final de los residuos radiactivos se lleva a cabo por la empresa pública Enresa. Hay una etapa inicial de gestión por parte de los productores, que puede llegar a reducir el volumen inicial de algunos residuos generados, por medio del almacenamiento temporal y decaimiento hasta niveles determinados. El control de la seguridad en la gestión corresponde al Consejo de Seguridad Nuclear.

6. ¿Qué es El Cabril? Realizar un pequeño trabajo sobre esta instalación (dónde se encuentra ubicada, para qué se utiliza este centro y cuándo empezó a funcionar).
   El Cabril es el nombre del almacenamiento definitivo para los residuos de muy baja, baja y media actividad en España. Se encuentra ubicado en el municipio de Hornachuelos (Córdoba) y está en funcionamiento desde 1992. Es gestionado por Enresa.

7. ¿Qué se hace en España con el combustible gastado de una central nuclear?
   El combustible gastado de las centrales nucleares, una vez finalizada su vida útil, se descarga bajo agua en las piscinas existentes en las centrales (el agua actúa como refrigerante y blindaje frente a las radiaciones emitidas). Posteriormente, el combustible se introduce en contenedores diseñados específicamente y se mantiene en un Almacenamiento Temporal Individualizado (ATI) en cada central nuclear, en espera de la creación de un almacén definitivo para ubicarlos.

8. ¿Qué otras alternativas conoces? ¿Qué es la transmutación?
   Existe la opción del reproceso o tratamiento del combustible gastado, con el fin de recuperar el uranio y el plutonio presentes en ellos para ser utilizados como nuevos combustibles.
   La transmutación es la conversión de un elemento químico en otro mediante una reacción nuclear. Aplicado a los residuos radiactivos, se trataría de transformar los isótopos radiactivos presentes en los residuos en isótopos estables, eliminando de esta forma su impacto radiológico y peligrosidad.

UNIDAD 7. LOS RESIDUOS RADIACTIVOS

Las actividades humanas con materiales radiactivos generan residuos a los que se denomina residuos radiactivos. La gestión de los residuos radiactivos tiene como objetivo fundamental que no se produzcan daños a las personas o al medio ambiente como consecuencia de las radiaciones ionizantes.

¿Qué son y de dónde proceden los residuos radiactivos?

Un residuo radiactivo es cualquier material para el cual no está previsto ningún uso, que contiene isótopos radiactivos en cantidades superiores a determinados valores establecidos por las autoridades competentes.

Los residuos radiactivos se producen en las distintas aplicaciones en las que está presente la radiactividad, a saber:

- Aplicaciones energéticas. Se producen residuos radiactivos como consecuencia de la operación y el desmantelamiento de las centrales nucleares, entre los que se encuentra el combustible nuclear gastado. Todos estos residuos suponen alrededor del 90 % de la producción total.

- Aplicaciones no energéticas. Derivadas de los usos de los isótopos radiactivos, fundamentalmente en actividades como investigación, medicina e industria. Este grupo se conoce como el de los “pequeños productores”. Todos estos residuos suponen alrededor del 10 % de la producción total.

Los residuos radiactivos se clasifican en diferentes categorías teniendo en cuenta su nivel de radiactividad (muy baja, baja, media y alta actividad) y el periodo de semidesintegración o vida media, es decir, por el tiempo que los radionúclidos tardan en perder su actividad. Según organismos internacionales como el OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica), se reconocen dos grandes categorías:

Residuos de vida corta

Contienen isótopos radiactivos con una vida media inferior a 30 años. Ejemplos comunes: cobalto-60, cesio-137 (aunque este tiene vida media cercana a 30 años). Uso frecuente en medicina nuclear, industria e investigación.

Residuos de vida larga

Contienen cantidades significativas de radionúclidos cuya vida media supera los 30 años. Ejemplos: plutonio-239 (vida media ~24.000 años), neptunio-237, uranio-238. Uso frecuente en combustible nuclear gastado y residuos de reactores nucleares.

Según el VII Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), aprobado en diciembre de 2023, se estima que al cierre de las centrales nucleares en España se habrán generado un total de 234 000 m^3 de residuos radiactivos. Esta cifra incluye tanto los residuos de baja y media actividad (RBMA y RBBA) como los residuos de alta actividad (RAA) y el combustible nuclear gastado.

Cantidades estimadas de residuos radiactivos en España:

- Residuos de baja y media actividad (RBMA) y residuos de muy baja actividad (RBBA): Se prevé que se generen aproximadamente 220 000 m^3 de estos residuos, los cuales serán gestionados en el centro de almacenamiento de El Cabril.

- Residuos de alta actividad (RAA) y combustible nuclear gastado: Se estima que se generarán alrededor de 14 000 m^3 de estos residuos, que incluyen el combustible gastado y otros residuos de alta actividad.

Estas cifras reflejan las previsiones hasta el cierre completo de las centrales nucleares en España, programado entre 2027 y 2035. Es importante destacar que, debido a la decisión de no construir el Almacén Temporal Centralizado (ATC) en Villar de Cañas, se ha optado por una estrategia de almacenamiento descentralizado en Almacenes Temporales Individualizados (ATI) en las propias centrales nucleares.

En comparación con otros tipos de residuos, las cantidades de residuos radiactivos que se generan anualmente en toda la Unión Europea son pequeñas (figura 2.7.1).

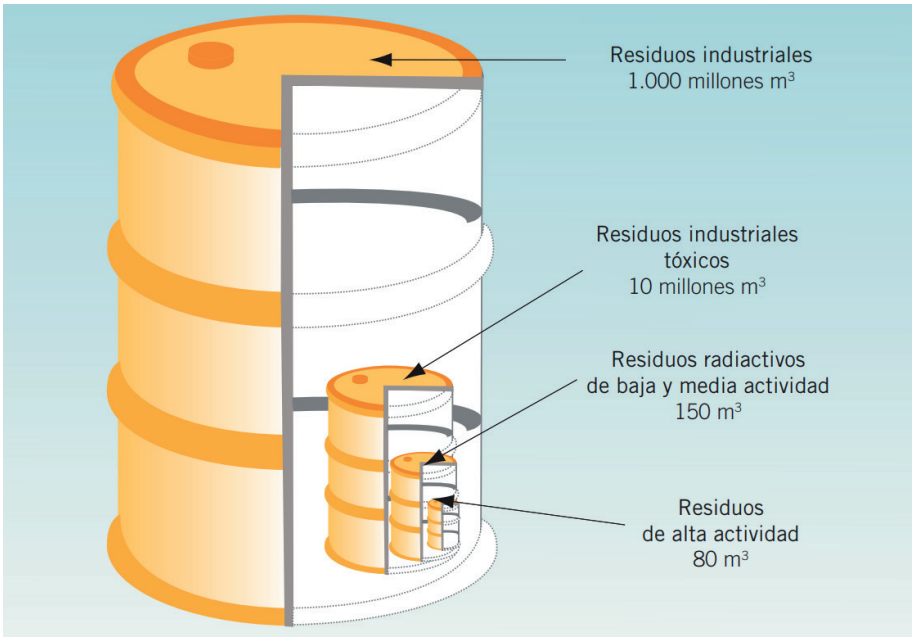


Figura 2.7.1. Producción anual de residuos en la Unión Europea.

La gestión de los residuos radiactivos

El objetivo de la gestión a largo plazo de los residuos radiactivos es proteger a las personas y al medio ambiente contra toda emisión o diseminación de las materias radiactivas que contienen.

Para ello, los residuos radiactivos se concentran y se confinan hasta que su radiactividad desaparece, aislándolos del medio ambiente y de las personas mediante barreras que aseguran que los contaminantes radiactivos no se dispersarán y podrán llegar a producir algún daño.

En función de su contenido de radiactividad los residuos radiactivos se confinarán en instalaciones de almacenamiento construidas cerca de la superficie de la tierra (muy baja, baja y media actividad) o en formaciones geológicas profundas (alta actividad).

La seguridad en la gestión de los residuos radiactivos

El Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) ha establecido los principios de seguridad que deben tenerse en cuenta en la gestión de los residuos radiactivos y que son aplicados en todos los países.

Cada tres años, España se somete a un examen de carácter internacional para que los demás países valoren la seguridad de nuestra gestión de los residuos radiactivos. El primero de dichos exámenes se realizó en 2003.

Para el almacenamiento definitivo de los residuos de muy baja, baja y media actividad en España está en funcionamiento, desde 1992, la instalación superficial de El Cabril, en Hornachuelos (Córdoba).

Mientras se decide una opción final para el combustible gastado y los residuos de alta actividad, es necesario poner en práctica soluciones para su almacenamiento temporal.

El combustible gastado de las centrales nucleares, una vez finalizada su vida útil, se descarga bajo agua en las piscinas existentes en las centrales. El agua actúa como refrigerante y blindaje frente a las radiaciones emitidas por el combustible gastado. Posteriormente, una vez saturada la capacidad de las piscinas, se han adoptado soluciones para cada central mediante el Almacenamiento Temporal Individualizado (ATI). Los elementos combustibles se introducen en contenedores que constituyen un sistema de barreras ingenieriles (acero inoxidable, plomo y hormigón) para extraer calor residual y retener las radiaciones.

Estos contenedores están diseñados para ser almacenados a la intemperie o en un edificio y ser transportados para su posterior gestión. Actualmente existen en operación ATI en las centrales nucleares de Trillo y José Cabrera.

Una opción posible para el almacenamiento temporal del combustible gastado es la construcción de un Almacén Temporal Centralizado (ATC) que sería una instalación diseñada para guardar en un único lugar el combustible gastado de las centrales nucleares y los residuos de alta actividad que se producen en España. Pero también existe la posibilidad de crear almacenes temporales en cada una de las centrales nucleares.

El diseño de ATC estudiado hasta la fecha se dispondría en la superficie del terreno para almacenar en seco los residuos mediante un sistema de espacios modulares. El sistema diseñado blinda la radiación emitida y evacua el calor generado, garantiza el control y aislamiento del material radiactivo, proporciona capacidad de almacenamiento temporal durante cien años y permite la extracción posterior del combustible y otros residuos para las siguientes etapas de gestión.

En la actualidad se investiga la transmutación de elementos radiactivos como una posible vía para la gestión de los residuos de alta actividad y del combustible gastado, que permitiría reducir su peligrosidad.

La transmutación es la conversión de un elemento químico en otro mediante una reacción nuclear. Aplicado a los residuos radiactivos, se trata de encontrar

métodos para transformar los isótopos radiactivos presentes en los residuos en isótopos estables, eliminando de esta forma su impacto radiológico.

Un ejemplo de isótopo radiactivo que se puede transmutar en otro menos peligroso es el tecnecio-99, que tiene una vida media muy larga. Si el tecnecio-99 se irradia con neutrones, se transforma en tecnecio-100 por absorción de un neutrón. Este isótopo se desintegra para producir el elemento estable rutenio, y lo hace en tiempos del orden de minutos, con lo que desaparece el problema de su almacenamiento a largo plazo.

En España, la gestión de los residuos radiactivos se lleva a cabo por la empresa pública Enresa y el control de la seguridad en la gestión corresponden al Consejo de Seguridad Nuclear.

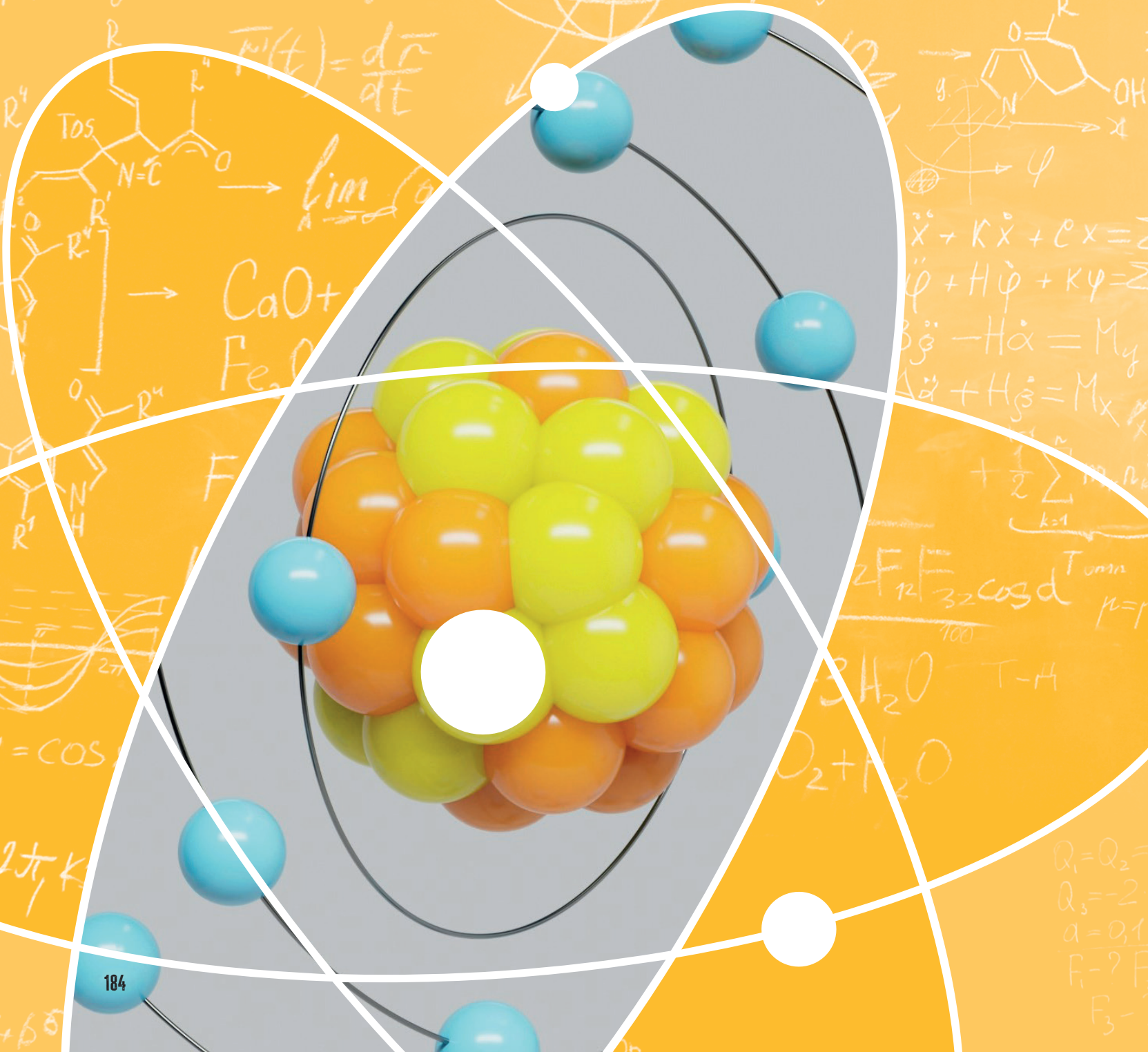
PUNTOS CLAVE

- **Los residuos radiactivos se generan en las distintas aplicaciones de los materiales radiactivos como son la producción de energía eléctrica en las centrales nucleares y las aplicaciones en medicina e investigación.**
- **La gestión de los residuos radiactivos se lleva a cabo aislándolos y confinándolos entre barreras de seguridad, hasta que su radiactividad decaiga a niveles que no puedan producir daños a las personas y al medio ambiente.**

Preguntas, tareas y respuestas

1. ¿Qué es un residuo radiactivo?
2. ¿Todos los residuos radiactivos son iguales?
3. ¿Dónde se producen los residuos radiactivos?
4. ¿Qué significa gestión segura de los residuos radiactivos?
5. ¿Quién lleva a cabo la gestión de los residuos radiactivos en España? ¿Y el control?
6. ¿Qué es El Cabril? Realiza un pequeño trabajo sobre esta instalación, dónde se encuentra ubicada, para qué se utiliza este centro y cuándo empezó a funcionar.
7. ¿Qué se hace en España con el combustible gastado de una central nuclear? ¿Qué otras alternativas conoces? ¿Qué es la transmutación?

SUPLEMENTO TÉCNICO





1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El estudio de la radiación y de la radiactividad ha desempeñado un papel importante en la evolución reciente de los conocimientos sobre la materia y la estructura del átomo.

Los primeros pasos: filosofía y teorías iniciales

Hasta comienzos del siglo XX no se sabía casi nada sobre el átomo y su núcleo. Desde entonces, se ha avanzado considerablemente en el conocimiento de su composición, sus propiedades y cómo romperlo para producir energía. Todos estos descubrimientos han sido obra de distintas personas y en muy pocos años. **Demócrito**, en el siglo V a.C., sentó una base conceptual importante, proponiendo la idea de que la materia está compuesta de partículas indivisibles (átomos) o combinaciones de ellas (del griego “átomos” que significa “indivisible”).

En 1803, **John Dalton** propuso una teoría sobre la composición de la materia, basada en la idea de los átomos. Los imaginaba como pequeñas esferas y afirmaba que todos los átomos de un mismo elemento eran iguales entre sí. En cambio, los átomos de diferentes elementos se diferenciaban en sus propiedades químicas. Con esta teoría, Dalton clasificó la materia en dos grupos, los elementos, que eran sustancias simples, y los compuestos, que se formaban por la combinación de estos elementos. A partir de esta clasificación, los químicos de la época se dedicaron a descubrir estos elementos y a organizarlos de manera lógica.

El ordenamiento de los elementos: la tabla periódica

En 1869, dos científicos, **Lothar Meyer y Dimitri Mendeleiev**, crearon tablas para organizar los elementos químicos, y sus ideas son muy similares a la tabla periódica que usamos hoy. Meyer organizó los elementos según su volumen atómico y sus puntos de fusión y ebullición. Notó que estas propiedades variaban periódicamente cuando aumentaba el peso atómico. Por su parte, Mendeleiev ordenó los elementos según sus propiedades químicas, ya que pensaba que estas estaban relacionadas con el peso atómico. Este último dejó espacios vacíos en su tabla para elementos que aún no se habían descubierto, pero predijo sus propiedades con bastante precisión.

Aunque la tabla de Mendeleiev fue un gran avance, tenía algunas inconsistencias. A principios del siglo XX, **Henry Moseley** resolvió esos problemas. Moseley descubrió que la verdadera clave para organizar los elementos no era el peso atómico, sino el número atómico (que es el número de protones que tiene un átomo). Gracias a esto, la tabla periódica moderna se organiza por el número atómico de los elementos.

Hoy en día, la tabla periódica contiene 118 elementos confirmados. Estos elementos están organizados en 7 filas (llamadas periodos) y 18 columnas (llamadas grupos).

El Descubrimiento de la Radiactividad y la Estructura del Átomo

El primer tipo de radiación ionizante artificial que utilizó el ser humano fue descubierto por **Wilhelm Conrad Röntgen** en 1895. Mientras experimentaba con los rayos catódicos, notó que una placa de cartón cubierta con cristales de sales de bario comenzaba a brillar, pero la luz desaparecía cuando apagaba la corriente. Röntgen descubrió que esos rayos, que llamó “rayos X”, podían atravesar materiales como papel, madera y una fina capa de aluminio, pero no el plomo. Además, al sostener un aro de plomo con sus dedos, no solo veía el aro, sino también los huesos de su mano. Pensó que podría “capturar” esa imagen en una placa fotográfica, lo que lo llevó a hacer la primera radiografía.

Un año después, en 1896, **Henri Becquere**l, un físico francés, descubrió la radiactividad mientras trabajaba con sales de uranio en su laboratorio. Tenía algunas placas fotográficas envueltas en papel negro en un cajón cercano a las sales de uranio, y al ver que las placas se velaban, a pesar de estar protegidas del entorno, comenzó a investigar. Descubrió que las radiaciones que impresionaban las placas provenían de las sales de uranio.

Este descubrimiento llevó a muchos científicos a investigar el fenómeno, y uno de los más destacados fue el matrimonio **Curie**. Al enterarse del hallazgo de Becquerel, comenzaron a tratar grandes cantidades de pechblenda, un mineral de uranio, para concentrar el uranio y estudiar sus radiaciones. En 1898, confirmaron que la radiactividad está relacionada con el núcleo del átomo, independientemente del estado de la sustancia o el compuesto, y que mientras el uranio emitía radiaciones, se transformaba en otros elementos químicos, que llamaron radio y polonio. Gracias a este descubrimiento, los Curie, junto con Becquerel, recibieron el Premio Nobel de Física en 1903.



Figura S.1.1. Retratos de Wilhelm Conrad Röntgen, Marie Curie y Henri Becquerel.

En 1897, **J.J. Thomson** descubrió una partícula cargada negativamente, a la que llamó electrón. Este descubrimiento le valió el Premio Nobel de Física en 1906. Después de descubrir el electrón, Thomson propuso que la materia se compone de dos partes, una negativa (los electrones) y una positiva. Según su modelo, los electrones estaban dispersos en una masa de carga positiva, como pasas en un pastel.

Más tarde, los científicos **Ernest Rutherford y Frederick Soddy** estudiaron las radiaciones emitidas por sustancias radiactivas y encontraron que había tres tipos de radiaciones ionizantes, alfa, beta y gamma. Se descubrió que las partículas alfa eran núcleos de helio, las partículas beta eran electrones, y las radiaciones gamma eran de naturaleza electromagnética.

La mecánica cuántica y el átomo

El descubrimiento de la naturaleza de las radiaciones permitió a **Ernest Rutherford** estudiar la estructura del átomo. Concluyó que el átomo tiene una zona central, el núcleo, que es positivo y donde se concentra toda su masa, mientras que los electrones giran alrededor de él, como si fueran planetas orbitando el Sol. Además, la carga negativa de los electrones es igual en magnitud a la carga positiva del núcleo, por lo que el átomo es eléctricamente neutro. Sin embargo, este modelo no explicaba bien la física clásica. Según esta, una partícula que gira aceleradamente debería emitir radiación y perder energía, lo que haría que los electrones cayeran al núcleo. Además, no podía explicar el espectro atómico.

En 1900, **Max Planck** propuso que la energía no se emite de manera continua, sino en pequeñas unidades individuales conocidas como “quantos”. Por esta teoría, Planck es considerado el fundador de la teoría cuántica y recibió el Premio Nobel de Física en 1918. Su trabajo sentó las bases para la investigación sobre la energía atómica.

Albert Einstein también hizo importantes avances en la física con su famosa ecuación $E = mc^2$, que muestra que la masa y la energía son dos formas diferentes de la misma cosa. En 1905, Einstein publicó estudios sobre la Teoría de la Relatividad Restringida y el Fenómeno Fotoeléctrico, donde aplicó la teoría de los cuantos de Planck para explicar cómo la luz puede liberar electrones de un material. Por este trabajo, recibió el Premio Nobel de Física en 1921.

En 1913, **Niels Bohr** propuso un nuevo modelo del átomo, en el que los electrones se distribuyen en capas definidas o niveles cuánticos a cierta distancia del núcleo. Bohr usó la mecánica cuántica para mejorar el modelo de Rutherford y resolver problemas como la emisión de radiación.

Según Bohr, los electrones giran en órbitas estacionarias y no emiten radiación mientras están en ellas. Sin embargo, cuando un electrón salta de una órbita de menor energía a una de mayor energía, absorbe un cuanto de energía (una cantidad), y cuando salta de una órbita de mayor energía a una de menor, pierde energía en forma de radiación. Por sus investigaciones, recibió el Premio Nobel de Física en 1922. El mayor éxito de Bohr fue dar la explicación al espectro de emisión del hidrógeno.

El núcleo atómico y la física nuclear

En 1918, **Ernest Rutherford** demostró la existencia de los núcleos de hidrógeno, sugiriendo que el núcleo de hidrógeno debía ser una partícula fundamental, ya que el número atómico del hidrógeno era uno. Esta partícula fue nombrada **protón,** un nombre que ya había sido propuesto en 1886 por el científico **Goldstein** para describir ciertas partículas observadas en los tubos catódicos.

En 1924, **Louis-Victor de Broglie** propuso que la materia tiene una naturaleza ondulatoria, una idea que fue ampliada por Erwin Schrödinger en 1926. Esto llevó a una actualización del modelo atómico. En el modelo de Schrödinger, se dejó atrás la idea de los electrones como pequeñas esferas cargadas que giraban alrededor del núcleo (una concepción basada en la experiencia macroscópica). En su lugar, Schrödinger describió a los electrones utilizando una función de onda, cuyo cuadrado representaba la probabilidad de que el electrón se encontrara en una región específica del espacio, conocida como orbital.

En la década de 1930, I**rene y Jean Frédéric Joliot-Curie** realizaron un importante avance al obtener los primeros nucleidos radiactivos artificiales. Bombardearon boro y aluminio con partículas alfa para producir isótopos radiactivos de nitrógeno y fósforo. Este descubrimiento mostró que la radiactividad, que hasta entonces solo se conocía en la naturaleza, podía ser creada artificialmente mediante el bombardeo de ciertos elementos con partículas alfa. Por este logro, recibieron el Premio Nobel de Química en 1935.

En 1932, James Chadwick llevó a cabo experimentos con una radiación especial, que definió como corpúsculos, o partículas que formaban esa radiación. Esta radiación no tenía carga eléctrica y su masa era casi igual a la del protón. Inicialmente se pensó que esta partícula era una combinación de un protón y un electrón, pero experimentos posteriores descartaron esta idea y confirmaron que se trataba de una nueva partícula llamada neutrón. A partir de estos descubrimientos, Werner Heisenberg desarrolló la teoría de que el núcleo atómico está compuesto por protones y neutrones.

En 1938, los científicos **Lise Meitner**, **Otto Hahn** y **Fritz Strassmann** descubrieron la **fisión nuclear**, un proceso en el que los núcleos de uranio se dividen en dos núcleos más pequeños cuando son bombardeados con neutrones, liberando una gran cantidad de energía. Otto Hahn recibió el Premio Nobel de Física en 1944 por este descubrimiento.

En 1941, **Enrico Fermi** desarrolló el primer reactor nuclear. En 1938, Fermi ya había recibido el Premio Nobel de Física por sus investigaciones sobre los nuevos elementos radiactivos generados por la irradiación con neutrones y las reacciones nucleares con neutrones lentos. Junto con su equipo, Fermi bombardeó 60 elementos con neutrones, obteniendo isótopos de 40 de ellos y llevando a cabo la transmutación de uranio (elemento 92) en neptunio (elemento 93), un elemento que no existía en la naturaleza.

En 1942, Fermi logró que el **r**eactor nuclear CP-1 comenzara a funcionar, consiguiendo así la primera reacción de fisión en cadena controlada y automantenida, un paso crucial en el desarrollo de la energía nuclear.

Más allá del protón, el neutrón y el electrón: La física de partículas

Los primeros modelos atómicos solo consideraban tres tipos de partículas subatómicas: protones, electrones y neutrones. Sin embargo, más adelante, al estudiar más a fondo la estructura interna de los protones y neutrones, se descubrió que estas partículas no eran simples, sino que estaban formadas por partículas aún más pequeñas llamadas quarks. Además, en el modelo cuántico, se descubrió que para que las partículas dentro de un átomo se mantuvieran unidas, se necesitaban otras partículas, conocidas como bosones. Algunos de estos bosones son los piones, gluones y fotones.

Algunos de los descubrimientos clave sobre estas partículas fueron los siguientes:

- **Wolfgang Pauli** propuso en 1931 la existencia de una partícula llamada neutrino (un leptón) para explicar un misterio en la desintegración beta, que parecía violar la conservación de la cantidad de movimiento. **Enrico Fermi** fue

quien le dio el nombre de neutrino. Sin embargo, esta partícula no se descubrió hasta 1956.

- **Hideki Yukawa** sugirió la existencia de los piones en 1935 para explicar la fuerte fuerza que mantiene unidos a los protones y neutrones en el núcleo del átomo.

- El muón, una partícula que se descubrió en 1936, inicialmente se pensó que era un pión, pero más tarde se entendió que era una partícula diferente.

- En la década de los 50, se descubrió el kaón en los rayos cósmicos.

En esa misma década de los 50, el avance de nuevos aceleradores de partículas y detectores permitió descubrir una gran cantidad de partículas conocidas como hadrones.

A medida que se descubrían nuevos hadrones, aparecieron también más partículas que parecían duplicar las funciones de las partículas más pequeñas. Entre estas partículas se encontraron el tauón, que es un "electrón pesado", además del muón, y se descubrieron diversas series de quarks pesados. Sin embargo, ninguna de estas partículas más pesadas parece formar parte de los átomos que componen la materia ordinaria.

En 1961, se propuso un modelo para clasificar los hadrones mediante quarks, lo que marcó el inicio de la llamada edad de oro de la física de partículas. Este periodo culminó en la década de los 70 con la formulación completa de la teoría unificada, conocida como el modelo estándar de partículas.

El CERN y la exploración del universo

La Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) es el mayor laboratorio de investigación en física de partículas a nivel mundial. Fundado en 1954 por 12 países europeos, el CERN actualmente cuenta con 24 Estados miembros, entre los que se encuentra España, los cuales comparten la financiación y la toma de decisiones en la organización. A lo largo de su historia, el CERN ha sido pionero en numerosos avances científicos.

El primer gran éxito científico del CERN se produjo en 1984, cuando Carlo Rubbia y Simon Van der Meer obtuvieron el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de los bosones W y Z. En 2012, el laboratorio confirmó la existencia del bosón de Higgs, una partícula fundamental predicha por el Modelo Estándar de la física de partículas. Este descubrimiento fue posible gracias al uso del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el acelerador de partículas más grande y potente del mundo.

En años más recientes, el CERN ha continuado ampliando los límites del conocimiento. En 2021, los experimentos realizados en el LHCb llevaron al descubrimiento de nuevas partículas exóticas, ampliando nuestra comprensión sobre la composición de la materia.

Historia de la protección radiológica

A principios del siglo XX, tras el descubrimiento de los rayos X y la radiactividad, su uso se extendió rápidamente en hospitales y laboratorios de todo el mundo. Sin embargo, debido a que estos fenómenos eran recién descubiertos y su naturaleza no se entendía completamente, no se tomaban las precauciones necesarias. Esto resultó en que muchas personas, especialmente médicos radiólogos que utilizaban los rayos X y científicos que manipulaban materiales radiactivos, sufrieran los efectos negativos de una exposición excesiva e incontrolada a la radiación.

Existen numerosas anécdotas, muchas de ellas con desenlaces trágicos, que ilustran las consecuencias de la falta de conocimiento sobre los posibles efectos biológicos de la radiación. Uno de los casos más conocidos fue el del ayudante de laboratorio del inventor de las técnicas fluoroscópicas, quien sufrió la pérdida de su cabello, quemaduras y ulceraciones graves antes de fallecer a causa de su exposición continua a altos niveles de rayos X. Irene Curie, hija de Pierre y Marie Curie, quien descubrió junto a Frédéric Joliot la radiactividad artificial, murió de leucemia a mediados del siglo XX. Su enfermedad probablemente fue un efecto biológico tardío debido a la exposición a radiación durante su juventud.

Dado que los primeros afectados por la exposición excesiva a la radiación fueron médicos y físicos, la comunidad científica pronto tomó conciencia del problema. En 1920, en Hamburgo, se erigió un monumento en memoria de más de 100 radiólogos pioneros que fallecieron por exposición excesiva en el ejercicio de su profesión. En 1922, la Sociedad Americana de Rayos X y la Sociedad Americana del Radio realizaron el primer estudio para establecer niveles aceptables de irradiación, basándose en la exposición que causaba quemaduras en la piel de los pacientes.

En 1928, durante el Congreso Internacional de Radiología celebrado en Londres, se produjeron dos hechos importantes para la evolución de la radiología. Se definió el “roentgen” como la unidad física para medir la cantidad de radiación producida por un tubo de rayos X durante su operación. Además, se estableció la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés), que desde 1950 ha sido la autoridad científica independiente encargada de establecer las bases científicas y los principios de protección radiológica.

En ese mismo año, también se creó la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (CIUMR) para ayudar a cuantificar la exposición a la radiación.

Otros organismos importantes en el ámbito de la protección radiológica son:

- **El Comité Científico de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR)**, creado en 1955, cuyo objetivo es reunir datos sobre los niveles de exposición a radiación y sus efectos biológicos, sanitarios y medioambientales.

- **El Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA)**, fundado en 1957 y que forma parte de la ONU, desarrolla normas internacionales de protección radiológica basadas en las recomendaciones de la ICRP, las cuales sirven como base para las normas nacionales en los Estados miembros.

- **La Unión Europea (UE)**, que desde la firma del tratado EURATOM en 1957, establece normas de protección radiológica (basadas en las recomendaciones de la ICRP) que son obligatorias para sus Estados miembros.

A lo largo de los años, diversas revisiones y actualizaciones de las normativas de protección radiológica se han realizado para mejorar la seguridad.

- En 1966, la ICRP revisó los límites de dosis a los trabajadores expuestos, fijando un límite de 50 mSv anuales.

- En 1970, formuló el principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*, "tan bajo como razonablemente sea posible") para reducir la exposición a la radiación.

- En 1977, la ICRP adoptó el sievert (Sv) como unidad de dosis, y en 1979 la Conferencia General sobre Pesos y Medidas adoptó las unidades del sistema internacional: sievert (Sv), gray (Gy) y becquerel (Bq).

- En 1980, el Consejo de Comunidades Europeas actualizó la Directiva sobre las normas básicas de seguridad para la protección sanitaria contra los riesgos de la radiación ionizante.

- En 1991, la ICRP definió la dosis unitaria efectiva en sieverts (Sv), sumando las dosis absorbidas por todos los tejidos y órganos del cuerpo, ponderados según el tipo de radiación y el tejido afectado. Para los trabajadores expuestos, el límite de dosis fue establecido en 100 mSv en 5 años, con un límite anual de 50 mSv.

En España, la legislación sobre protección radiológica se basa en las recomendaciones de la ICRP, recogidas en el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. El **CSN** es el único organismo con competencias en seguridad nuclear y protección radiológica en el país. Su misión principal es proteger a los trabajadores expuestos, a la población y al medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.

2. LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

En el capítulo anterior, vimos que la mayor parte de los conocimientos actuales sobre la estructura atómica provienen de los avances realizados en la primera mitad del siglo XX. El modelo atómico ha evolucionado a lo largo de los años:

- **Modelo de Thomson (1897)**: Joseph Thomson propuso el concepto del átomo como una esfera de materia positiva en la que se distribuyen uniformemente los electrones, conocido como el modelo "pastel con pasas" (figura S.2.1).

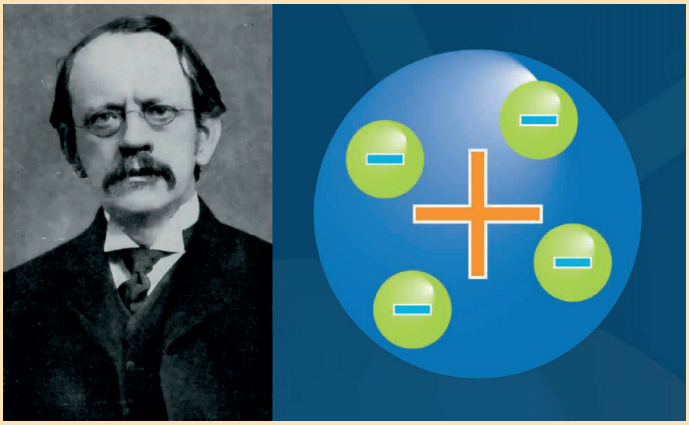


Figura S.2.1. Modelo atómico de Thomson.

- **Modelo de Bohr (1913)**: Niels Bohr y Walter Bothe propusieron que los electrones giran alrededor del núcleo en órbitas, de manera similar a un sistema planetario (figura S.2.2).

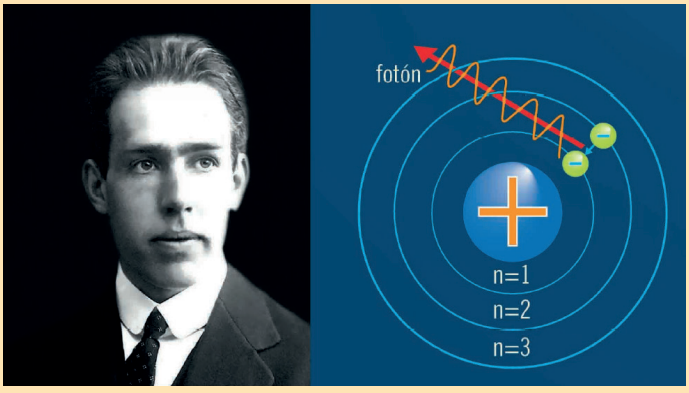


Figura S.2.2. Modelo atómico de Bohr.

- **Modelo de Schrödinger (1926)**: En este modelo, Schrödinger abandona la idea de los electrones como esferas diminutas y describe a los electrones mediante una función de onda. La probabilidad de encontrar un electrón en una determinada región del espacio, conocida como orbital, es representada por el cuadrado de esta función de onda (figura S.2.3).

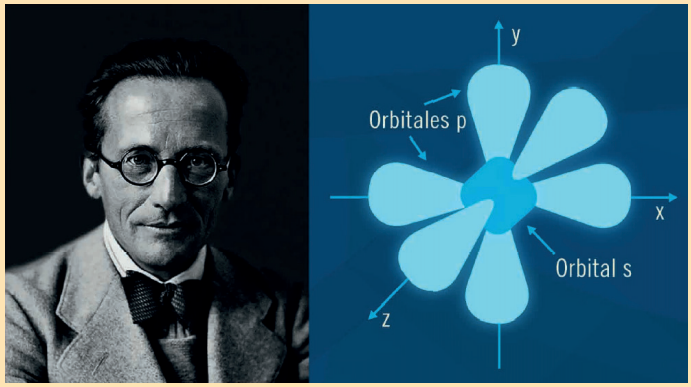


Figura S.2.3. Modelo atómico de Schrödinger.

Partes del átomo

El átomo se divide en dos partes fundamentales: el núcleo y la corteza (figura S.2.4).

- El núcleo: es la parte central del átomo y contiene partículas con carga positiva llamadas protones, y partículas neutras sin carga, los neutrones. La masa de un protón es casi idéntica a la de un neutrón. Lo que caracteriza a cada elemento es el número de protones en su núcleo, denominado número atómico (Z).

- La corteza: es la parte exterior del átomo, donde se encuentran los electrones, partículas con carga negativa. Estos electrones se distribuyen en diferentes niveles de energía alrededor del núcleo. La masa de un electrón es unas 2000 veces menor que la de un protón.

Para que un átomo sea eléctricamente neutro, debe tener el mismo número de protones y electrones. Por lo tanto, el número atómico (Z) también coincide con el número de electrones.

Por ejemplo, el átomo de oxígeno tiene ocho protones y ocho electrones en sus órbitas. Los electrones orbitales del oxígeno se distribuyen con dos electrones en una órbita interna y seis en una externa, que puede contener hasta ocho electrones. En el caso del átomo de hidrógeno, tiene un protón en su núcleo y un electrón. Así, cuando dos átomos de hidrógeno se combinan con un átomo de oxígeno, forman una molécula de agua, que es estable debido a la cantidad de electrones en las órbitas.

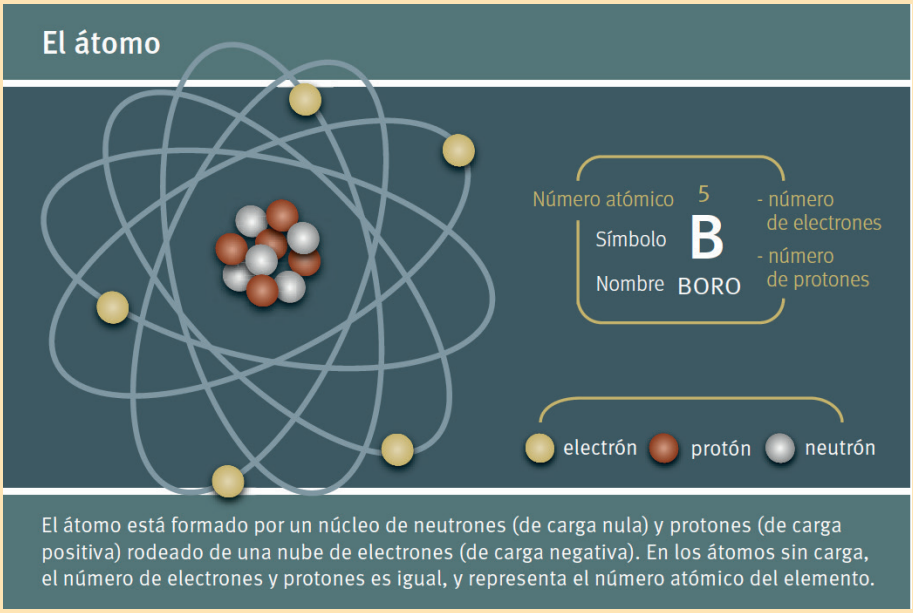


Figura S.2.4.
El átomo está formado por un núcleo de neutrones (de carga nula) y protones (de carga positiva) rodeado de una nube de electrones (de carga negativa). En los átomos sin carga o neutros, el número de electrones y protones es igual, y representa el número atómico del elemento.

Isótopos: variaciones en el número de neutrones

La masa del núcleo está determinada por el número total de protones y neutrones. La suma de protones y neutrones de un átomo se llama número másico (A).

Aunque los átomos de un mismo elemento tienen el mismo número de protones, pueden variar en el número de neutrones. A estos átomos se les conoce como isótopos.

Ejemplo del hidrógeno

El hidrógeno tiene tres isótopos, tal y como se puede observar en la figura S.2.5:

1. **Protio**: es el isótopo más común, con un solo protón en su núcleo. Representa el 99.98 % de los átomos de hidrógeno.

2. **Deuterio:** es el isótopo con un protón y un neutrón. El agua que contiene este isótopo se llama agua pesada.

3. **Tritio:** tiene un protón y dos neutrones. Es un isótopo inestable y su núcleo se desintegra, emitiendo una partícula beta.

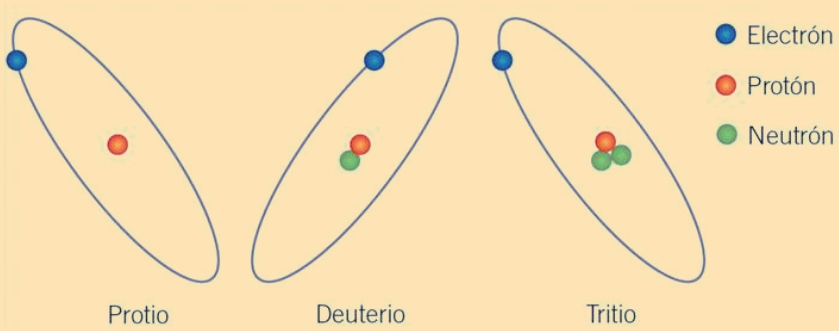


Figura S.2.5. Representación de los tres isótopos del hidrógeno*.

*https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497985

Radiactividad: núcleos inestables

Cuando la relación entre protones y neutrones en un núcleo atómico está desequilibrada, el núcleo se vuelve inestable. Para recuperar la estabilidad, el núcleo emite partículas y energía en un proceso llamado radiactividad o desintegración radiactiva.

Henri Becquerel descubrió la radiactividad en 1896 al observar que las sales de uranio emitían radiación de forma espontánea. La desintegración radiactiva puede liberar diferentes tipos de radiación, incluyendo:

- **Partículas alfa (α):** Son núcleos de helio (dos protones y dos neutrones) (figura S.2.6).

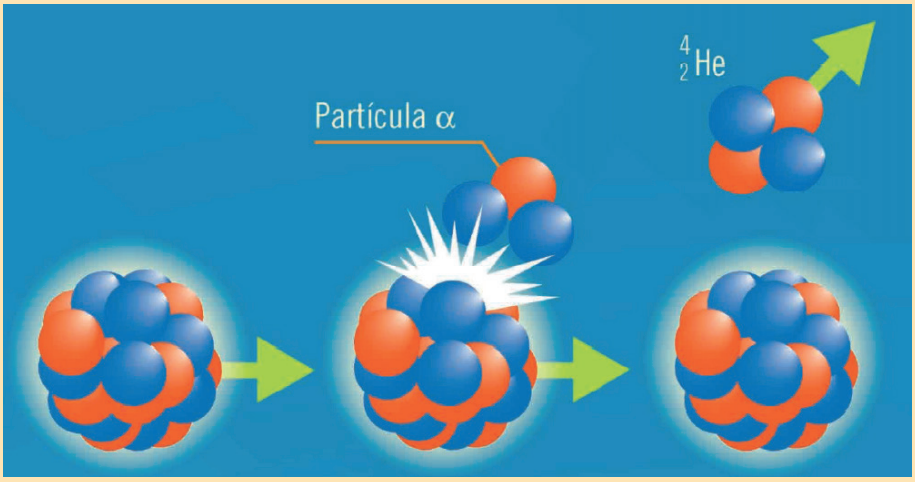


Figura S.2.6. Radiación alfa.

- **Partículas beta (β):** Son electrones o positrones (antipartículas de los electrones) (figura S.2.7).

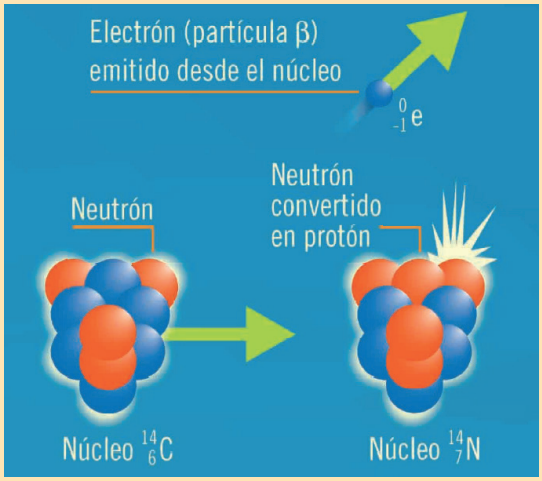


Figura S.2.7.
Radiación beta.

- **Rayos gamma (γ):** son radiación electromagnética de alta energía (fotones) (figura S.2.8).

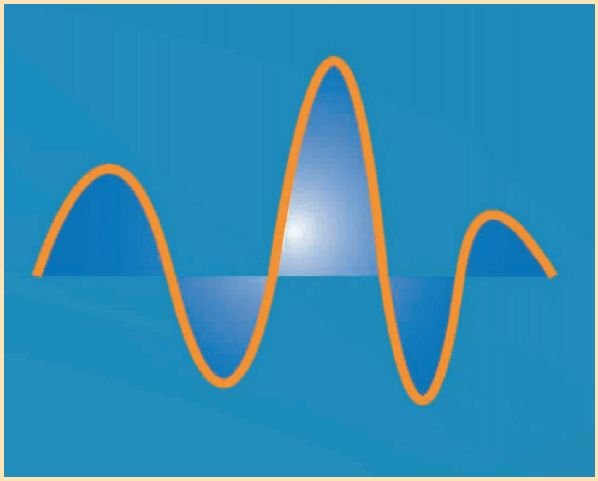


Figura S.2.8.
Radiación gamma.

La idea es que elementos más grandes como el uranio y el plutonio también tienen isótopos inestables. El plutonio-240, por ejemplo, emite una partícula alfa (compuesta por dos protones y dos neutrones) durante su desintegración. Esta partícula es un núcleo de helio, y la energía liberada puede ser radiación ionizante.

Historia de la radiactividad

- En 1903, Ernest Rutherford descubrió la desintegración radiactiva del uranio.
- En 1898, Pierre y Marie Curie aislaron el radio, que también pertenece a la familia de elementos radiactivos.
- En 1934, Frédéric Joliot e Irene Curie crearon radiactividad artificial al bombardear aluminio con neutrones, transformándolo en fósforo-32.
- En 1939, Joliot, Halban y Kowarski descubrieron el proceso de fisión nuclear al bombardear uranio con electrones, lo que llevó a la división de los núcleos de uranio en fragmentos más ligeros, como criptón-89 y bario-144. Este proceso libera una enorme cantidad de energía y es la base de la reacción en cadena que se utiliza en los reactores nucleares.
- El primer reactor nuclear fue activado por Enrico Fermi en 1942.
- Reactor nuclear natural: en Oklo, Gabón, un reactor nuclear natural funcionó espontáneamente hace 1,700 millones de años, debido a un equilibrio en la proporción de uranio-235.

CERN

La Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) es el laboratorio de investigación de física de partículas más grande del mundo. En este laboratorio fueron descubiertos los quarks y otras partículas subatómicas (bosones W y Z).

El CERN es famoso por su enorme acelerador de partículas subterráneo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC). En 2012, se dio uno de los mayores logros del CERN, el descubrimiento del bosón de Higgs, abriendo un campo totalmente nuevo en la investigación física de partículas.

Actualmente, los investigadores del CERN siguen trabajando y se ha dado a conocer el diseño del Futuro Colisionador Circular (FCC), que sustituirá al LHC.

3. ESPECTRO DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICO: RADIACIÓN IONIZANTE Y NO IONIZANTE

El ser humano está familiarizado con muchos tipos de radiaciones diferentes: la luz del sol, las radiaciones que permiten el funcionamiento de los aparatos de radio y televisión, los hornos de microondas, los espectáculos con rayos láser, las radiaciones que producen los equipos de rayos X, etc.

El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

La propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas se denomina radiación electromagnética. En este tipo de radiación no hay desplazamiento de masa, y la energía se transporta en "paquetes" llamados fotones, que viajan a la velocidad de la luz.

Además de la luz del sol, son radiaciones electromagnéticas las señales de radar, las ondas de radio o televisión, las microondas, los rayos X, la radiación gamma de origen nuclear o los rayos cósmicos. A diferencia de las ondas mecánicas, como el sonido –que necesita un medio material para propagarse–, las ondas electromagnéticas no lo necesitan, pueden propagarse a través del vacío también.

Las radiaciones electromagnéticas son fenómenos ondulatorios que obedecen todos a las mismas leyes físicas y pueden describirse en función de los mismos parámetros, su longitud de onda, su frecuencia y su energía. Cuanto menor es la longitud de onda, mayor es la frecuencia y la energía que transporta. Para hacerse una idea "visual" de estas ondas puede pensarse en las olas del mar (figura S.3.1.): la longitud de onda sería la distancia entre las crestas de dos olas sucesivas y la frecuencia el número de olas que llegan a la playa cada segundo. Cuando las olas son anchas (mayor longitud de onda) llegan poco a poco a la playa (tienen menos frecuencia y energía).

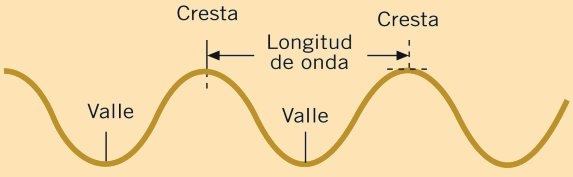


Figura S.3.1. Dibujo de una onda transversal.

Cuando la longitud de onda de la radiación es grande (por ejemplo, del orden del diámetro de la tierra), tiene poca frecuencia y lleva poca energía, pero conforme va disminuyendo la longitud de onda, aumenta la frecuencia y también la energía.

La longitud de onda se mide en unidades de longitud (km, m, mm) y es la distancia que hay entre dos crestas.

La frecuencia es el número de vibraciones por unidad de tiempo y su unidad es por tanto el ciclo por segundo denominado hercio (Hz).

La energía se mide en electronvoltios, eV, (en el sistema internacional en Julios, donde 1 eV = 1,6 x 10^{-19} Julios).

Ordenando las radiaciones desde las de menor a las de mayor energía se obtiene lo que se denomina el espectro electromagnético (figura S.3.2). Este espectro se divide en dos partes: radiaciones no ionizantes y radiaciones ionizantes.

Se denominan radiaciones no ionizantes a las radiaciones electromagnéticas menos energéticas, que no tienen la suficiente energía como para arrancar electrones de los átomos, como por ejemplo, la radiofrecuencia, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible y la radiación ultravioleta.

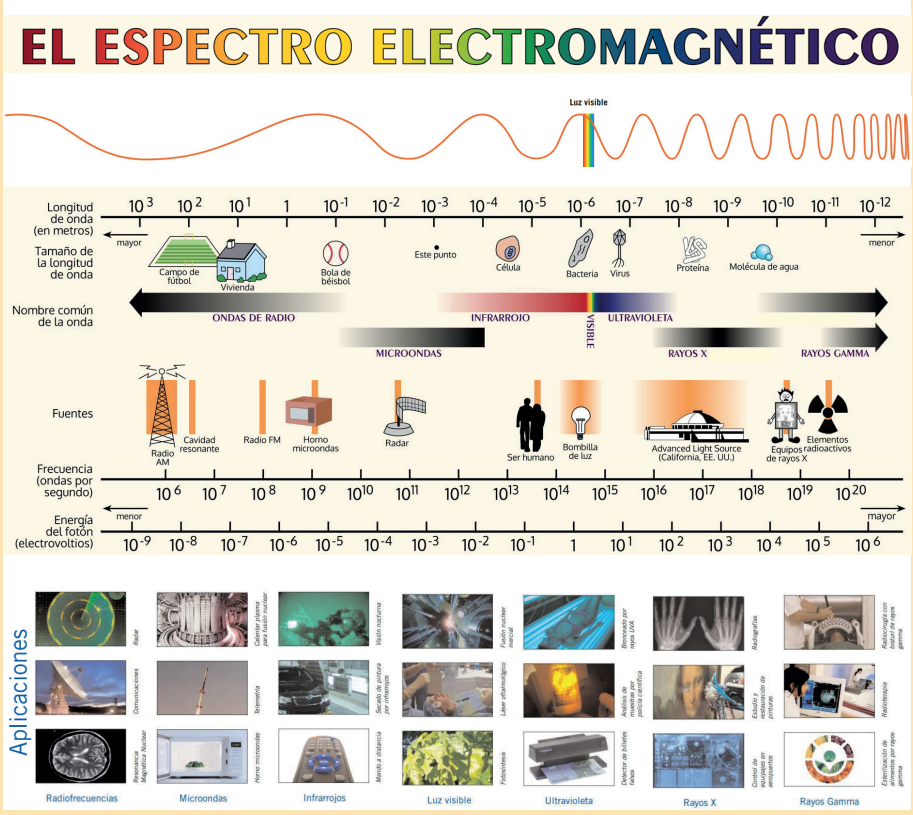


Figura S.3.2. Espectro de ondas electromagnéticas (documentos FDE-01.03–Espectro de ondas electromagnéticas–Folleto y FDE-01.03–Espectro de ondas electromagnéticas–Póster del Centro de documentación del CSN).

A continuación, destacaremos el origen y ciertas propiedades de las radiaciones no ionizantes:

- Los campos electromagnéticos comprenden tres grupos de ondas, las de frecuencia menor que las ondas de radio, la radiofrecuencia y las ondas microondas.

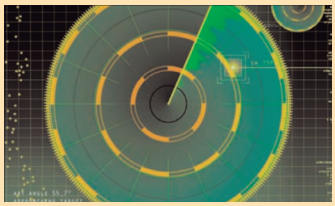
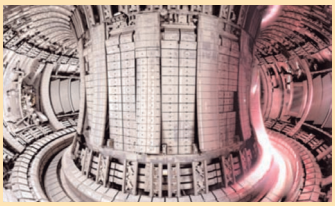
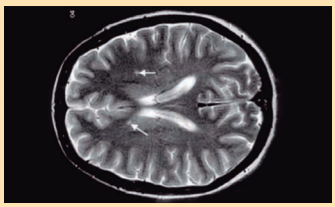
RADIOFRECUENCIAS	MICROONDAS
 Radar	 Calentar plasma para fusión nuclear
 Comunicaciones	 Telemetría
 Resonancia magnética nuclear	 Horno microondas

Figura S.3.3. Aplicaciones de las ondas de baja frecuencia.

Dentro del grupo de las de frecuencia menor que las ondas de radio están las producidas por las redes de alta tensión, los electrodomésticos, la resonancia magnética nuclear o las placas de cocina de inducción.

Para este tipo de radiaciones, los posibles efectos sobre el cuerpo humano podrían ser quemaduras y descargas eléctricas, pero los equipos que dan lugar a este tipo de ondas se diseñan para ser intrínsecamente seguros.

En la zona de la radiofrecuencia, se sitúan las ondas por las que se transmiten las señales de radio, televisión y de los aparatos domésticos. Las antenas de TV, teléfono y radar, también producen ondas de este tipo. Para estas

radiaciones, los efectos sobre el cuerpo humano se deben a tres posibles factores: resonancia, calentamiento y quemaduras o descargas eléctricas.

Las microondas, con longitud de onda menor que las de la radiofrecuencia, son un tipo de ondas capaces de reaccionar con los tejidos generando calor en capas profundas. Esta propiedad se utiliza en el horno de microondas y, a baja intensidad, para estimular el crecimiento del hueso tras una fractura.

- Las radiaciones ópticas, son de longitud de onda menor que las microondas. La parte central de esta zona del espectro es la correspondiente a la luz visible para el ojo humano, o lo que es lo mismo, a los colores que se aprecian en un arco iris. En este grupo tenemos, además, la radiación infrarroja y la radiación ultravioleta.

INFRARROJOS	LUZ VISIBLE	ULTRAVIOLETA
 Visión nocturna	 Fusión nuclear inercial	 Bronceado por rayos UVA
 Secado de pintura por infrarrojos	 Fotosíntesis	 Análisis de muestras por policía científica
 Mando a distancia	 Fotosíntesis	 Detector de billetes falsos

Figura S.3.4. Aplicaciones de las radiaciones ópticas.

Los efectos principales de esta radiación sobre el cuerpo humano son que producen calor y son causa de efectos fotoquímicos. Uno de los efectos fotoquímicos conocidos es la producción de vitamina D por el cuerpo humano tras su exposición a la luz del sol, a partir de una sustancia precursora que se encuentra en la piel.

En el grupo de las radiaciones ópticas tenemos la radiación infrarroja. Es del orden de la mitad de la radiación solar que llega a la Tierra porque la atmósfera reduce su intensidad. Aunque es invisible, podemos sentirla por el calor que transmite a la piel. La sensación de calor que produce un fuego también nos llega transportada por la radiación infrarroja. La sobreexposición a este tipo de radiación produce las quemaduras que todos hemos experimentado al acercarnos demasiado a un fuego. A corto plazo la radiación infrarroja produce quemaduras y, a largo plazo, puede producir cataratas en los ojos, inducidas por efectos térmicos. Para protegerse hay que alejarse de la fuente de radiación y ponerse gafas adecuadas de protección.

Otro tipo de radiación dentro del grupo de las radiaciones ópticas es la luz visible. Aproximadamente el 45 % de la radiación solar que llega a la atmósfera terrestre es luz visible. La radiación visible, que es la que puede captar el ojo humano, va desde el rojo (la de mayor longitud de onda) hasta el azul (la radiación de menor longitud de onda).

La luz visible, especialmente la azul, puede deslumbrar cuando una lente la concentra en el ojo o en la retina. A corto plazo, la luz muy brillante puede dañar la córnea del ojo y, a largo plazo, los niveles de iluminación demasiado elevados pueden dañar la retina. Ante determinados estímulos luminosos, el ojo se protege de forma refleja mediante parpadeos.

Los equipos láser son dispositivos diseñados por el ser humano para amplificar el haz de luz emitido, y que este haz de luz sea de unas características determinadas. Los equipos láser pueden emitir radiaciones en todo el espectro de las radiaciones ópticas, desde la zona infrarroja a la ultravioleta. El órgano del cuerpo más sensible a la radiación láser es el ojo, aunque también la piel puede verse afectada en algún caso. Con algunos láseres de potencia extremadamente alta, puede causar despigmentación de la piel y daños a los órganos más superficiales. Para proteger el ojo de los rayos láser siempre hay que utilizar gafas especiales.

La radiación ultravioleta supone del orden del 5 % de la radiación solar que entra en la atmósfera de la Tierra. Es invisible, pero para los seres humanos es esencial recibir alguna cantidad de este tipo de radiación para poder sintetizar vitamina D mediante una reacción fotobiológica. La sobreexposición a la radiación ultravioleta produce, a corto plazo, el enrojecimiento de la piel y daños en los ojos (ceguera de la nieve), y a largo plazo, los efectos incluyen el envejecimiento prematuro, cáncer de piel y, en el caso de los ojos, amarillamiento y desarrollo prematuro de cataratas, de forma que es muy importante la protección. Afortunadamente, el ozono existente en las capas altas de la atmósfera reduce mucho la intensidad de la radiación ultravioleta, pero la protección depende de la latitud, la hora del día, el momento del año, la altitud, las nubes y la contaminación del aire. Para protegerse se usan cremas, gafas y protección en la cabeza.

Algunas lámparas fluorescentes emiten radiación ultravioleta, de modo que es posible recibir cantidades peligrosas por exposición excesiva en una camilla de bronceado o por la proximidad de arcos voltaicos de soldadura.

Se llaman radiaciones ionizantes a las radiaciones más energéticas, que tienen la suficiente energía como para arrancar electrones de los átomos, convirtiendo a estos últimos en iones.

Entre las radiaciones ionizantes están los rayos X, los rayos gamma –las dos radiaciones electromagnéticas– y las radiaciones corpusculares, que transportan haces de partículas (alfa, beta y neutrones). Estas radiaciones ionizantes no son perceptibles por los sentidos.

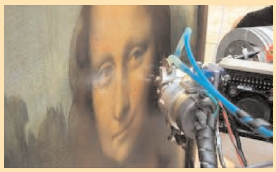
RAYOS X	RAYOS GAMMA
 Radiografías	 Radiocirugía con bisturí de rayos gamma
 Estudio y restauración de pinturas	 Radioterapia
 Control de equipajes en aeropuertos	 Esterilización de alimentos por rayos gamma

Figura S.3.5. Aplicaciones de las radiaciones ionizantes.

A continuación, destacaremos la procedencia y ciertas propiedades de este tipo de radiaciones:

- Los rayos X son radiaciones electromagnéticas con una energía tal que les permite atravesar los tejidos del cuerpo humano y otros materiales. Cuanto mayor es su energía mayor es su poder de penetración, lo que les permite atravesar espesores considerables de materia y proporcionar imágenes muy claras de las estructuras internas de la misma, como las que aparecen en las radiografías de un hueso o del interior de un equipaje.

  La naturaleza de los rayos X es idéntica a la de los rayos gamma, pero los rayos X tienen su origen en la corteza de los átomos (la capa de electrones que rodea los núcleos), mientras que los rayos gamma se originan en los propios núcleos.

  Los rayos X se originan por el choque de electrones con un determinado material, en el interior de un tubo de vacío. Por tanto, se trata de un dispositivo fabricado por el ser humano.

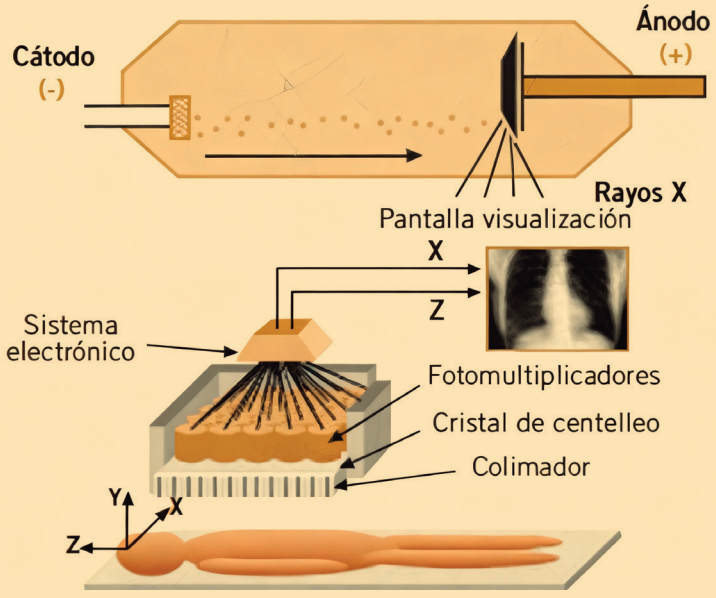


Figura S.3.5. Generación de los rayos X.

- Radiación gamma es una radiación electromagnética, en general, de energía superior a la de los rayos X. Esta radiación se genera espontáneamente en los núcleos inestables o radiactivos para intentar alcanzar la estabilidad. Por tanto, es una transferencia de energía (en forma de radiación gamma), para pasar de un estado excitado a un estado estable.

- Radiación cósmica es aquella que recibe la Tierra de forma continua procedente del Sol y de los espacios interestelares.

  Está formada por varios tipos de componentes, radiación electromagnética y partículas elementales con gran cantidad de energía.

  Al chocar los rayos cósmicos con la atmósfera de la Tierra, produce reacciones nucleares en la zona más externa de la capa protectora del planeta, formándose átomos radiactivos tales como el tritio o el carbono-14 y "cascadas" de partículas y radiaciones. Por tanto, la atmósfera actúa como filtro protector evitando que lleguen a la superficie de la Tierra partículas de muy alta energía, pero, a la vez, es la causa de que se produzcan radiaciones de menor energía y cierta cantidad de radiactividad.

  Tenemos que tener en cuenta dos factores que contribuyen a la exposición de radiación cósmica, como son la altitud y en menor medida la latitud. A mayor altura, la capa de la atmósfera sobre nosotros es menor que a nivel del mar. Así, hay una mayor contribución de radiación cósmica en la cima de una montaña o viajando en avión que a nivel del mar. También afecta la latitud por el propio campo magnético de la Tierra, aunque en menor medida —en los polos es menor que en el ecuador—.

Por tanto, el ser humano vive en contacto con la radiación denominada ionizante. Básicamente puede recibir radiación cósmica, que hemos mencionado en el punto anterior, y radiación terrestre. Esta última proviene de los elementos radiactivos de origen natural que se encuentran en la corteza terrestre. Estos elementos radiactivos son ubicuos en el medio natural y están también presentes en los suelos, el agua o la vegetación. El propio cuerpo humano contiene isótopos radiactivos (principalmente ^{40}K y ^{14}C) que dan lugar a exposiciones internas. La inhalación de radón y la ingestión de isótopos naturales presentes en el agua y en los alimentos son también fuente de exposiciones internas.

Este conjunto de radiaciones ionizantes naturales integra la llamada radiación de fondo, que depende de muchos factores, como son el lugar donde se vive, la composición del suelo, los materiales de construcción, la estación del año, la altitud, la latitud y, en cierta medida, las condiciones meteorológicas.

Además de este tipo de radiación nos encontramos con la radiación ionizante artificial, que es producida por ciertos aparatos o métodos desarrollados por el ser humano, como por ejemplo los aparatos de rayos X, los aceleradores de partículas o las centrales nucleares.

4. RADIACTIVIDAD Y RADIACIONES IONIZANTES

Desintegración radiactiva

Todas las sustancias conocidas están formadas por átomos o combinaciones de ellos. El átomo es la parte más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades y que no es posible dividir mediante procesos químicos. Todos los átomos de un mismo elemento son iguales, tienen la misma masa, y átomos de diferentes elementos tienen distinta masa.

El átomo tiene una estructura interna formada por un núcleo y una corteza o nube de electrones, con carga negativa, orbitando en torno al núcleo (figura S.4.1). El núcleo del átomo está formado por dos tipos de partículas: los protones, que tienen carga eléctrica positiva, y los neutrones, que no tienen carga eléctrica. En un átomo neutro, que es su estado habitual, el número de electrones es igual al número de protones.

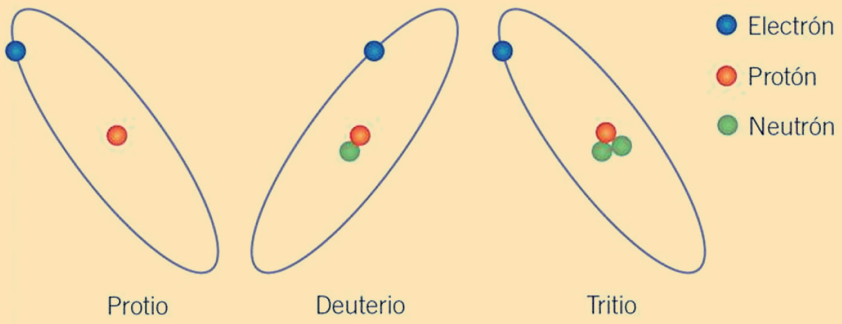


Figura S.4.1
Estructura del átomo.

Como las cargas eléctricas iguales se repelen, los protones tienen repulsión electromagnética, pero se mantienen unidos por la existencia de una fuerza más potente, denominada fuerza nuclear fuerte.

En condiciones normales de equilibrio, las partículas del núcleo del átomo permanecen fuertemente unidas, pero un exceso o una falta de neutrones puede romper ese equilibrio. Entonces se convierten en elementos inestables, con tendencia a transformarse en otros elementos.

Estas transformaciones, llamadas también desintegraciones, se producen liberando gran cantidad de energía en forma de radiaciones ionizantes (alfa, beta y gamma, como se muestra en la figura S.4.2), y este fenómeno se conoce con el nombre de radiactividad, descubierta por Becquerel en 1896.

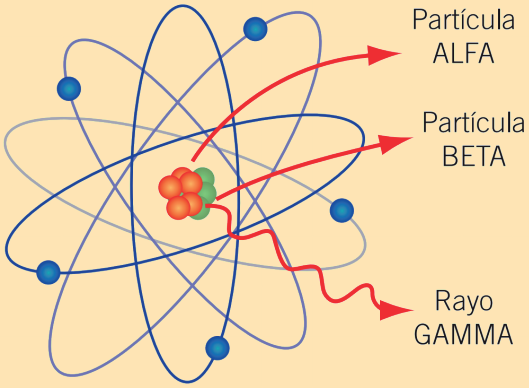


Figura S.4.2.
Tipos de radiación.

Actividad

Es el número de desintegraciones que tienen lugar cada segundo en una cantidad dada de material radiactivo. Se mide en unidades denominadas becquerel (Bq), en honor a Henri Becquerel. Un becquerel equivale a una desintegración atómica por segundo.

La actividad no depende del tamaño ni de la masa de una sustancia, depende del isótopo radiactivo. Una fuente de radiación del tamaño de una cerilla utilizada por ejemplo en la industria del acero, puede ser billones de veces más activa que un bidón de residuos radiactivos.

Periodo de semidesintegración

Cada elemento radiactivo tiene su propia vida. Algunos isótopos radiactivos solo son activos durante periodos de tiempo muy cortos mientras que otros se mantienen activos durante miles de millones de años. En el transcurso de ese tiempo y en sucesivas desintegraciones los elementos inestables se transforman en otros, para terminar convirtiéndose en elementos estables. De este modo, el uranio-238 se transforma en radón-222, antes de convertirse en plomo, que ya es estable. Cada paso se produce a un ritmo determinado.

El intervalo de tiempo necesario para que una determinada cantidad de un elemento se reduzca a la mitad por desintegración, se denomina periodo de semidesintegración o semivida. El periodo de semidesintegración es único e invariable para cada radionucleido, y puede variar de una fracción de segundo a billones de años.

La actividad de un radionucleido se va reduciendo en semidesintegraciones sucesivas, a 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, del valor inicial. De esta forma es posible predecir la actividad futura que le queda a una sustancia concreta.

Tipos de radiaciones ionizantes

- **Partículas alfa (α):** son núcleos de helio-4 (constituidos por dos protones y dos neutrones) que se emiten en ciertas desintegraciones nucleares. Tienen gran masa en comparación con el resto de las radiaciones ionizantes. En el aire, la radiación alfa solo puede recorrer un par de centímetros, y una hoja de papel o la misma piel del cuerpo humano son suficientes para protegernos de sus efectos. Por ello, no son peligrosas a menos que se incorporen al organismo (contaminación interna) a través de una herida abierta o sean ingeridas o inhaladas, siendo entonces especialmente peligrosas, ya que liberan toda su energía hacia las células circundantes.

- **Partícula beta (β):** son electrones libres (beta negativos) o positrones (beta positivos, antipartícula del electrón) liberados en determinadas desintegraciones nucleares. Tienen una masa bastante menor que las partículas alfa, lo que les confiere mayor poder de penetración que estas. Traspasan láminas de papel pero se detienen ante láminas de metal, ventanas de metacrilato y prendas de ropa. Sin embargo, pueden dañar la piel desnuda.

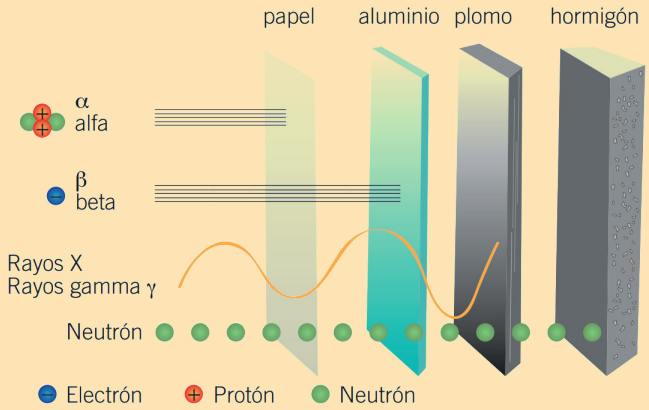


Figura S.4.3.
Poder de penetración de los diferentes tipos de radiación.

- **Rayos gamma (γ):** son radiaciones electromagnéticas (sin carga ni masa) muy penetrantes que se detienen mediante grandes muros de hormigón o plomo y que se diferencian de los rayos X solo en su procedencia, los rayos gamma proceden de un núcleo mientras que los rayos X, proceden de las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones.

- **Neutrones:** este tipo de radiación es muy penetrante debido a que no tiene carga eléctrica. No son ionizantes por sí mismos, pero si golpean a otro núcleo pueden activarlo o causar la emisión de una partícula cargada o un rayo gamma, por lo que indirectamente sí producen radiación ionizante. Los neutrones tienen más capacidad de penetración que los rayos gamma y solo puede detenerlos una gruesa barrera de hormigón, agua o parafina, o ser absorbidas con venenos neutrónicos (cadmio, boro y gadolinio).

Interacción de las radiaciones ionizantes con la materia

La radiación ionizante, cuando entra en contacto con la materia, suele arrancar electrones de los átomos circundantes mediante un proceso que se llama ionización, de forma directa como en el caso de las partículas cargadas, o indirecta, como por ejemplo es el caso de los fotones. Esta es la razón por la que a estas radiaciones se las conoce con el nombre de radiaciones ionizantes.

Los procesos de interacción de la radiación con la materia son la causa de los efectos producidos por las radiaciones (en particular, los efectos biológicos producidos en seres vivos) y determinan las condiciones de propagación de la radiación en un medio material así como el diseño de los blindajes apropiados para cada tipo de radiación.

- Las partículas α al atravesar la materia tienen un recorrido prácticamente rectilíneo y al colisionar con los átomos provocan, en gran medida, ionización (arranca electrones y el átomo queda convertido en ion), y excitación, donde el electrón excitado vuelve a su estado inicial emitiendo radiación gamma. En un corto recorrido pierden toda la energía.

- Las partículas β tienen un poder de penetración mayor que las alfa. Su penetración máxima (alcance) disminuye de forma más o menos exponencial, debido a que como las partículas beta tienen diferentes energías, se detienen después de recorrer distancias variables en el medio. En su colisión con los átomos:

  – Provocan ionización, aunque en menor medida que las partículas alfa.

  – Provocan emisión de rayos X fluorescentes: cuando la energía de la radiación β es alta, puede despedir de su órbita un electrón interno. El hueco que deja es ocupado por otro electrón, emitiendo rayos X característicos de ese salto electrónico.

  – Sufren dispersión y retrodispersión.

  – La partícula β se ve frenada y desviada por el campo eléctrico de este. La diferencia de energía se emite en forma de radiación electromagnética de espectro continuo, llamada Bremsstrahlung o radiación de frenado. La probabilidad de que suceda aumenta con la energía de la partícula y con el número atómico de los átomos del medio.

- Las radiaciones X y γ son radiaciones electromagnéticas muy penetrantes. Al interaccionar con la materia dan lugar a electrones secundarios que provocan excitación e ionización en el medio que atraviesan (por eso son radiaciones indirectamente ionizantes).

El proceso de cesión de energía (atenuación) cumple una ley exponencial:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

donde x = espesor del material o blindaje; μ = coeficiente atenuación lineal, que depende del material que atraviesa la radiación y de la energía del fotón.

Este tipo de radiación interacciona directamente con la materia mediante alguno de los procesos siguientes:

– Efecto fotoeléctrico. En este proceso el fotón queda completamente absorbido transfiriendo su energía a un electrón de una capa interna que escapa del átomo al que estaba ligado. La vacante se ocupa con otro electrón del mismo átomo emitiéndose radiación electromagnética característica (rayos X característicos).

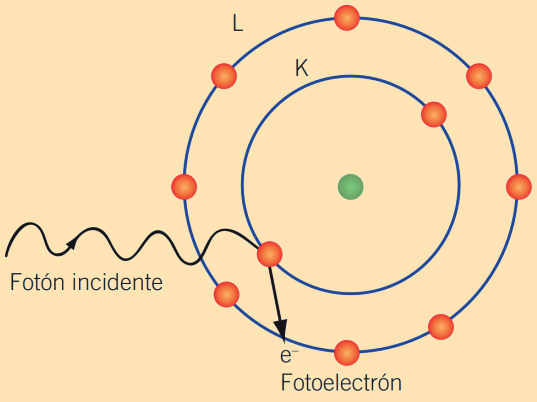


Figura S.4.4.
Efecto fotoeléctrico.

– Efecto Compton. El fotón solo cede parte de su energía al electrón de una capa externa con el que interacciona y se desvía de su trayectoria inicial (se dispersa). La energía cedida varía dependiendo del ángulo de dispersión.

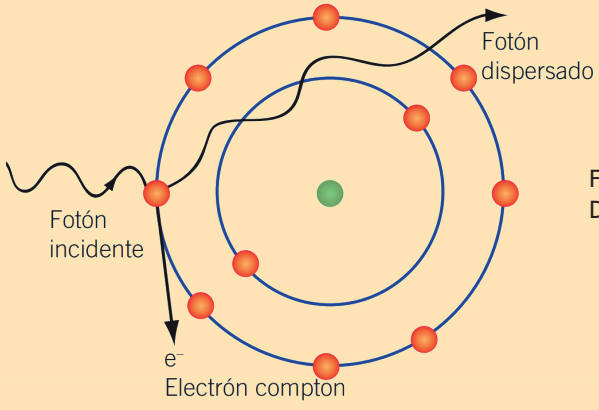


Figura S.4.5.
Dispersión Compton.

– Formación de pares. El fotón incidente se transforma en un electrón y un positrón. Para ello, este fotón debe superar la energía de unión (1,022 MeV).

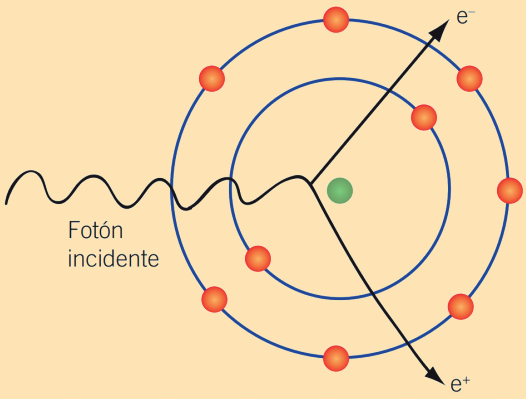


Figura S.4.6.
Formación de pares.

La probabilidad de que se produzca un efecto u otro depende de la energía de los fotones incidentes y de la naturaleza de la sustancia atravesada.

- Entre los procesos de interacción de los neutrones con la materia tenemos:

  – Dispersión elástica (tipo bola de billar): termalización.

  – Dispersión inelástica, con formación de un núcleo excitado y emisión de rayos gamma, mediante las cuales el neutrón pierde energía (moderación de neutrones).

  – Absorción: reacciones nucleares en las que el neutrón desaparece, pueden ser del tipo: captura radiactiva (n,γ), emisión de partículas (n,p) (n,γ), y de fisión.

Los efectos de la interacción de la radiación con la materia se aprovechan en distintas aplicaciones industriales, investigación, medicina...

Cuando las radiaciones ionizantes interaccionan con los tejidos biológicos, al tener estos un alto contenido en agua, se produce ionización de los átomos que compone la molécula de agua, dando lugar a un aumento de los radicales libres presentes en los tejidos. Estos radicales libres presentan una gran reactividad química, que permite alterar moléculas importantes que forman parte de los tejidos de los seres vivos.

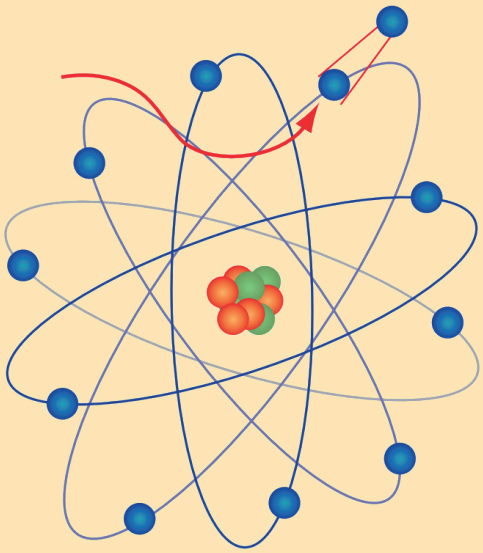


Figura S.4.7.
Ionización: cuando las partículas cargadas interaccionan con un átomo arrancando algún electrón, ionizan el átomo.

Cuando el material genético resulta afectado se puede producir la transmisión incompleta o incorrecta de la información genética, lo que conduciría a un desarrollo celular anormal y a la producción de tumores o mutaciones.

Según la cantidad y el tipo de radiación y los tejidos, órganos o sistemas afectados, los efectos pueden ser inmediatos o retardados. Estos efectos son también utilizados en radioterapia para destruir células cancerosas.

Sin embargo, los tejidos biológicos disponen de mecanismos de reparación celular que les permite reaccionar y recuperarse de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.

Dosis debida a la radiación ionizante

Como se ha visto hasta ahora, la energía de este tipo de radiación produce el daño y la cantidad de la misma que se absorbe en el tejido vivo se denomina dosis. La dosis se mide en unas unidades llamadas sievert (Sv), llamadas así en honor del doctor Rolf Sievert, un pionero sueco en protección radiológica.

En el contexto habitual de la protección radiológica es más frecuente utilizar la milésima parte de esta unidad (milisievert, mSv) o, incluso, la millonésima parte (microsievert, µSv).

- Dosis absorbida: es una magnitud que determina la energía media absorbida en el medio por unidad de masa debida a la radiación que incide sobre él. Su unidad se llama gray (1 Gy = 1 julio de energía absorbido por kilogramo de

material). La dosis absorbida es insuficiente para expresar el efecto biológico que produce esta radiación, ya que depende de la característica de la radiación y del tejido expuesto a la misma.

Un Gy de radiación alfa es 20 veces más grande que un Gy de radiación gamma. Sin embargo, la radiación gamma tiene un efecto biológico relativamente menor que la radiación alfa, ya que penetra más en el tejido antes de alcanzar una molécula y luego sigue atravesando el cuerpo hasta salir, y pierde energía a medida que avanza. Un rayo gamma solo provoca lesiones en sitios concretos, de forma que el tejido puede soportarlo razonablemente bien e incluso puede reparar las lesiones causadas.

Sin embargo, una partícula alfa, pesada y relativamente grande, provoca grandes daños en un área pequeña y es más perjudicial para el tejido vivo. Para tener en cuenta estas dos realidades se introducen dos nuevas magnitudes: dosis equivalente y dosis efectiva.

- Dosis equivalente: es la dosis absorbida en un órgano o tejido (T), ponderada en función del tipo y calidad de la radiación®. Su unidad es el sievert (Sv). Se expresa mediante la fórmula:

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

$H_{T,R}$ = Dosis equivalente

$D_{T,R}$ = Dosis absorbida promediada en el órgano o tejido procedente de la radiación R

w_R = Factor de ponderación de la radiación (tabla S.4.1)

El valor de la dosis equivalente H permite comparar, desde el punto de vista de la protección radiológica, los diferentes daños que la misma dosis absorbida puede causar, en un órgano o tejido, dependiendo del tipo de radiación y de la energía de esta.

Tabla S.4.1. Factores de ponderación de la radiación, wR

Tipo y rango de energía	Factor de ponderación de la radiación
Fotones de todas las energías (gamma)	1
Electrones de todas las energías	1
Neutrones (según energía)	2,5-20
Partículas alfa	20

- Dosis efectiva (E): es la suma ponderada de las dosis equivalentes en los distintos órganos y tejidos del cuerpo a causa de irradiaciones internas y externas. Su unidad es también el sievert (Sv). Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

E = Dosis efectiva
H_T = Dosis equivalente en el órgano o tejido T
w_T = Factor de ponderación del órgano o tejido T (tabla S.4.2)

Tabla S.4.2. Factores de ponderación de tejidos y órganos, WT

Órgano o tejido (i)	Factor de ponderación, w_T	Suma parcial, $\sum w_{T,i}$
Médula ósea, colon, pulmón, estómago, mama	0,12	0,60
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivares, piel	0,01	0,04
Resto de tejidos	0,12	0,12
	Suma total de factores de ponderación, $\sum w_T$:	1

El valor de la dosis efectiva E, nos da una información sobre el riesgo global en el organismo humano. Tanto la dosis equivalente como la dosis efectiva son magnitudes utilizadas en la reglamentación actual para establecer los límites de dosis aplicables a los trabajadores/as expuestos/as y a los miembros del público.

Tabla S.4.3. Resumen de magnitudes

Magnitud	Fórmula	Símbolo	Unidad
Actividad		A	becquerel (Bq)
Dosis absorbida		D	gray (Gy)
Dosis equivalente	$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$	H	sievert (Sv)
Dosis efectiva	$E = \sum_T w_T \cdot H_T$	E	sievert (Sv)

La ley establece que en los lugares de trabajo en los que exista presencia de radiaciones ionizantes, es necesario controlar las dosis de radiación que pueden recibir los trabajadores y la población en general. Algunas personas reciben dosis de radiaciones más elevadas debido al tipo de trabajo que realizan, pero la mayoría de la población recibe una dosis de radiación ionizante artificial inferior a la de radiación natural.

5. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN Y ASPECTOS LEGALES

Biología humana

El efecto de la exposición a la radiación ionizante sobre el cuerpo depende del órgano expuesto. Las propiedades de las células determinan la importancia biológica de cada órgano. Más adelante se ilustra gráficamente la composición de una célula, pared o membrana celular, citoplasma y núcleo celular. Algunas células, conocidas como células germinales, son las responsables de nuestra reproducción, el resto recibe el nombre de células somáticas.

El núcleo celular contiene los cromosomas, que a su vez están formados por genes, mediante los cuales las células, del tipo que sean, transmiten información a sus células hijas. La sustancia constitutiva de los genes es el ADN (ácido desoxirribonucleico), que es el principal sujeto pasivo de los daños biológicos producidos por la radiación. La célula posee unos pocos ejemplares (probablemente solo dos) de cada gen, pero tiene, en cambio, decenas de miles de tipos diferentes de genes, muchos de los cuales son de vital importancia para la reproducción y normal funcionamiento de la célula.

Si el ADN sufre unos daños que imposibilitan a la célula para funcionar y dividirse normalmente, esta morirá inmediatamente o tras una o varias divisiones. Esto será tanto más grave para el organismo cuanto mayor sea la destrucción de células madre que generan las células hijas componentes de tejidos vitales como la médula ósea, la piel, los intestinos, los testículos, etc.

Cuando una célula sufre un daño genético, puede no morir, pero sí quedar con sus funciones alteradas de modo permanente. Así, una célula puede transformarse de manera tal que sus descendientes se conviertan en células cancerosas causantes de dicha enfermedad.

Las células germinales pueden experimentar una mutación dominante o recesiva que, en tal caso, se transmite a los descendientes de la persona afectada.

Efectos tisulares o deterministas de la radiación ionizante

El daño causado a un tejido por la ionización es proporcional a la cantidad de energía de la radiación que sea absorbida, cantidad que, normalizada por unidad de masa, recibe el nombre de dosis absorbida, y se mide en Gy (Julios · kg^{-1}). Hemos visto ya que el daño depende del tipo de radiación y del tejido expuesto.

Como consecuencia de una exposición importante a la radiación pueden resultar dañadas tantas células que el tejido no pueda ya seguir realizando su función.

Por consiguiente, la radiación en este tipo de efectos, actúa como muchos otros agentes tóxicos, cuyas consecuencias se manifiestan solo cuando se rebasa un determinado umbral. Estos primeros efectos pueden ser predichos para una persona determinada cuando se conoce la dosis de radiación recibida, por lo que reciben el nombre de efectos deterministas.

Por ejemplo, la exposición de todo el cuerpo a unos cuantos sievert provoca el síndrome de irradiación aguda (SIA) o incluso la muerte por fallo de alguna de las funciones inmunológicas o de producción de sangre. La exposición localizada a dosis de decenas de Sv produce daños en los tejidos afectados, tales como la piel y los tejidos subyacentes a esta.

Los tejidos más sensibles se hallan en las gónadas, el cristalino del ojo y la médula ósea. El resto del cuerpo es menos sensible, pero la exposición de todo el cuerpo a dosis elevadas produce toda una serie de efectos graves.

Síndrome de irradiación aguda (SIA): una persona expuesta a dosis superiores a los 2 Gy (Sv)[1] en todo el cuerpo, debido a una fuente de radiación externa (por tanto radiación X o gamma ya que la radiación alfa o beta no penetraría al ser detenida en los primeros centímetros de la piel) puede, en el espacio de unas pocas horas, sufrir vómitos a causa de los daños sufridos por el aparato digestivo.

Dosis de entre 3 y 5 Gy (Sv) en todo el cuerpo pueden ser fatales en el plazo de sesenta días si no se recibe atención médica muy especializada. A dosis de este calibre, la piel puede mostrar síntomas de enrojecimiento, efecto utilizado por los primeros radiólogos para cuantificar la exposición a la radiación. A dosis superiores a los 50 Gy, la persona expuesta puede morir en el plazo de dos días.

La prevención de los efectos deterministas queda garantizada estableciendo unos límites de dosis por debajo de la dosis umbral de dichos efectos.

Efectos estocásticos de la exposición a radiaciones ionizantes

La inducción de cáncer y los efectos hereditarios son ejemplos de efectos estocásticos, es decir, son de naturaleza probabilística (pueden o no producirse) y la probabilidad de que ocurran dependerá de la dosis recibida. Para este tipo

1. Gy de dosis absorbida da lugar a 1 Sv de dosis equivalente para radiaciones electromagnéticas (rayos gamma y rayos X) y electrones. Para otros tipos de radiación, para pasar de Gy a Sv debe multiplicarse por un factor 20 para partículas alfa y entre 1 y 20 para neutrones.

de efectos, a falta de una evidencia científica clara, se ha adoptado una actitud conservadora de tal forma que en el campo de la protección radiológica se supone cierta la hipótesis de que se pueden producir a cualquier nivel de dosis y no existe para ellos dosis umbral.

Para los efectos estocásticos, al no existir una dosis umbral conocida, estamos obligados a mantener los niveles de dosis tan bajos como razonablemente sea posible, con la finalidad de reducir la probabilidad de su inducción (en términos de protección radiológica, a este concepto se le conoce como ALARA, acrónimo de *As Low As Reasonably Achievable*). Estos efectos estocásticos inducidos por la radiación (principalmente cánceres y efectos hereditarios) no se diferencian de los mismos efectos cuando son producidos por causas naturales u otros factores. Por ello se dice que las anomalías que puede producir la radiación son inespecíficas.

Fuentes de exposición a la radiación: fuentes naturales y artificiales

El valor promedio anual de dosis que recibe un individuo de la población mundial a causa de fuentes naturales es de 2,4 mSv, del cual la mayor parte (1,3 mSv) procede de la contribución debida al radón-222, fluctuando estos valores en función del lugar en que se vive.

La dosis recibida a causa de fuentes artificiales es menor, alrededor de 1 mSv, de la cual la mayor contribución se debe al uso de radiaciones en medicina (0,65 mSv en promedio mundial, valor muy dependiente del índice de desarrollo de cada país). Se representa esta distribución entre fuentes naturales y artificiales en la figura S.5.1.

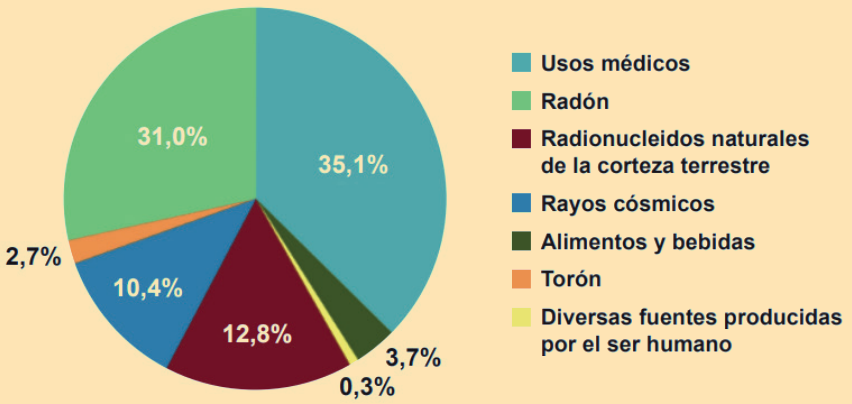


Figura S.5.1. Contribución de las distintas fuentes naturales y artificiales de radiación a la dosis promedio recibida por una persona en España.

Las dosis recibidas en procedimientos diagnósticos médicos son muy pequeñas, por lo que no producirían efectos deterministas y el riesgo de aparición de efectos estocásticos será en general sumamente bajo. Aun así existe, y aumenta con las sucesivas exploraciones radiológicas, ya que las dosis son acumulativas de por vida, en el sentido de que cada una de ellas representa una cierta probabilidad de causar efectos y por tanto la probabilidad total para el individuo va creciendo.

Más difícil es que la acumulación de dosis pueda alcanzar valores comparables a los umbrales de efectos deterministas, aunque en ciertos procedimientos con un objetivo terapéutico o curativo puede ocurrir (radiología intervencionista, y por supuesto radioterapia). Esto puede considerarse también desde el punto de vista poblacional. Se debe velar porque no haya un empleo innecesario de las exposiciones médicas en el conjunto de la población, para que el número de efectos causados se mantenga en valores lo menores posibles.

Por ello, todas las exposiciones médicas deberán justificarse previamente, teniendo en cuenta los objetivos específicos de la exposición y las características de cada persona. Deberán mostrar un beneficio neto suficiente, teniendo en cuenta los posibles beneficios diagnósticos y terapéuticos que producen, incluidos los beneficios directos para la salud de una persona y los beneficios para la sociedad, frente al detrimento personal que pueda causar la exposición. Se deberán también tener en cuenta, cuando proceda, las exposiciones ocupacionales y de miembros del público que lleven asociadas (Real Decreto 601/2019, de 18 de octubre, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas).

Riesgo de la exposición a radiación ionizante

Si se hace un análisis de comparación de riesgos (exposición a radiaciones ionizantes frente a otros riesgos más conocidos) se puede obtener una idea más clara de la verdadera magnitud de cada uno de ellos.

En una persona adulta:

- Una dosis de 1000 mSv supone un riesgo de morir de cáncer de un 5/100, siendo el porcentaje habitual de muerte por esta causa del 25/100.

- Una dosis de 20 mSv supone un riesgo de 1/1000 de morir de cáncer, valor que es similar al riesgo anual de muerte por causas naturales a la edad de 40 años.

En una mujer embarazada:

- La incidencia espontánea (azar) de malformaciones congénitas varía entre el 6-7/100.
- La incidencia espontánea de abortos es de un 30/100.
- La incidencia espontánea de retraso mental es de un 1/100.

Una aproximación útil de valoración del riesgo por exposición a la radiación ionizante en una mujer embarazada consiste en indicar la probabilidad de tener un hijo que no padezca malformaciones o cáncer, y ver cómo esta probabilidad se modifica por la exposición a la radiación, tal y como se indica en la tabla S.5.1:

Tabla S.5.1. Probabilidad de tener un hijo sano en función de la dosis de radiación

Dosis absorbida por el embrión / feto (mGy)	Probabilidad de que el niño NO tenga malformaciones (%)	Probabilidad de que el niño NO desarrolle cáncer entre los 0 y 19 años (%)
0	97	99,7
0,5	97	99,7
1	97	99,7
2,5	97	99,7
5	97	99,7
10	97	99,6
50	97	99,4
100	Próximo a 97	99,1

Como se puede comprobar, dosis entre 0 y 100 mSv no suponen un aumento de la probabilidad de incidencia de malformaciones en el recién nacido. Para dosis de 100 mSv, el incremento de probabilidad de incidencia de cáncer durante las primeras etapas de vida, es del 0,6 %.

La protección radiológica. Organismos relacionados. Legislación aplicable

La protección radiológica es una actividad multidisciplinar de carácter científico y técnico que tiene como objetivo la protección de las personas y del medio ambiente contra los efectos perjudiciales que pueden resultar de la exposición

a las radiaciones ionizantes. El objetivo de la protección radiológica es evitar los efectos deterministas y minimizar los efectos estocásticos.

Los organismos internacionales implicados en el desarrollo de normas relacionadas con la protección radiológica son:

- La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), fundada en 1928 por la Sociedad Internacional de Radiología, es la autoridad científica independiente que, desde 1950, tiene asignada la misión de establecer las bases científicas y la doctrina y principios en que se sustenta la protección radiológica. La publicación 103 de la ICRP (marzo 2007) incorpora las nuevas recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica en relación con la protección radiológica.

- El Comité Científico de Naciones Unidas para el estudio de los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), creado en 1955 en el seno de la ONU. Tiene el fin de reunir la mayor cantidad de datos sobre los niveles de exposición procedentes de las diversas fuentes de radiaciones ionizantes y sus consecuencias biológicas, sanitarias y medioambientales.

- El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), creado en 1957, dependiente de la ONU y que sobre la base de las recomendaciones elaboradas por la ICRP, desarrolla normas internacionales de protección radiológica, que sirven de base a las normas nacionales de sus Estados miembros.

- La Unión Europea (UE) que, también sobre la base de las recomendaciones elaboradas por la ICRP, desarrolla sus propias normas, que son de obligado cumplimiento para sus Estados miembros, a través del tratado constitutivo EURATOM firmado en 1957.

Debido al considerable desarrollo de los conocimientos científicos en relación con la protección radiológica y basándose en los criterios recomendados en la publicación número 103 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, el 17 de enero de 2014, se aprobó la Directiva 2013/59/ EURATOM, del Consejo, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. El artículo 2.b) del tratado EURATOM dispone que la Comunidad deberá establecer normas uniformes de protección radiológica de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes, dirigidas a señalar las dosis máximas admisibles que sean compatibles con una seguridad adecuada, los niveles de contaminación máximos admisibles y los principios fundamentales de la vigilancia sanitaria de los trabajadores. Esta directiva es de obligado cumplimiento para los Estados miembros de la UE, que posteriormente han realizado la transposición en sus respectivas legislaciones.

En el caso de España, la trasposición de la Directiva 2013/59 EURATOM se recoge en diferentes normas: 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 1217/2024, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes; Real Decreto 601/2019, de 18 de octubre, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas.

En España, el único organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica es el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), y en lo referente exclusivamente a la protección radiológica, tiene como misión principal la protección de los trabajadores, la población y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.

6. CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR Y FUNCIONAMIENTO DE LAS CENTRALES NUCLEARES

El ciclo de combustible nuclear

Se conoce como ciclo del combustible nuclear al conjunto de operaciones necesarias para la fabricación del combustible destinado a las centrales nucleares, así como al tratamiento del combustible gastado producido por la operación de las mismas. El ciclo abarca, por consiguiente, desde el proceso de la salida del mineral de la mina para la fabricación del combustible hasta su gestión como residuo radiactivo (figura S.6.1).

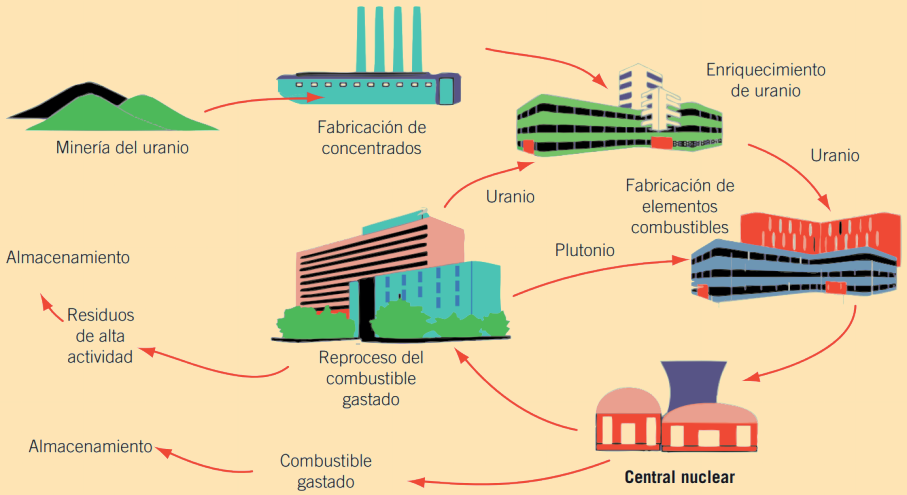


Figura S.6.1. El ciclo del combustible nuclear.

Se definen dos tipos de ciclo, ciclo abierto y ciclo cerrado. Si el combustible irradiado no se reprocesa es considerado en su totalidad como residuo radiactivo, se denomina ciclo abierto, con lo que no se completa el denominado ciclo del combustible nuclear. En el caso del uranio, el ciclo cerrado comprende varias etapas: la minería, la producción de concentrados de uranio (figura S.6.1), el enriquecimiento (si corresponde), la fabricación de los elementos combustibles, su utilización en el reactor y, finalmente, el reprocesamiento de los elementos irradiados. Este último paso permite recuperar el uranio remanente y el plutonio generado, separándolos de los residuos radiactivos de alta actividad que deben ser gestionados mediante un almacenamiento definitivo.

Etapas del ciclo del combustible:

– **1ª etapa.** Minería de uranio. Consiste en la obtención de minerales de uranio tales como pechblenda o uraninita.

– **2ª etapa.** Fabricación de concentrados. Consiste en la producción de concentrados de uranio a partir del mineral de uranio que después de varios tratamientos se obtiene como producto final U3O8, llamado torta amarilla o *yellow cake* (figura S.6.2).



Figura S.6.2. Concentrado de uranio.

– **3ª etapa.** Conversión a UF6 y enriquecimiento. El concentrado de uranio una vez preparado y mediante una serie de reacciones químicas (reducción, hidrofluoración, fluoración y destilación), es transformado a UF6 (hexafluoruro de uranio). Este se somete a un proceso de enriquecimiento, por difusión gaseosa o por centrifugación, para aumentar la proporción del isótopo uranio-235, que es el isótopo fisionable para producir reacciones nucleares, con respecto al uranio-238. El grado de enriquecimiento es función del diseño del reactor, y suele ser del orden del 3 al 5 % de uranio-235, aunque existen centrales que funcionan con uranio natural. Una vez enriquecido se reconvierte a óxido de uranio (UO_2).

– **4ª etapa.** Fabricación de elementos combustibles. La selección de UO_2 entre otros materiales se basa en su excelente estabilidad química, su estabilidad dimensional bajo irradiación, posee un punto de fusión muy alto, es compatible con los materiales de la "vaina" y además el coste de producción resulta económico. En la figura S.6.3. se muestran las etapas en el proceso de fabricación de un elemento combustible. El óxido de uranio se prensa y somete a fuertes temperaturas para su conversión en pastillas de tipo cerámico. Estas pastillas se sitúan en el interior de una "vaina" que se rellena con un gas inerte en su interior formando así la varilla de combustible. Las

varillas se colocan en un armazón junto con otros elementos auxiliares para formar un elemento de combustible.

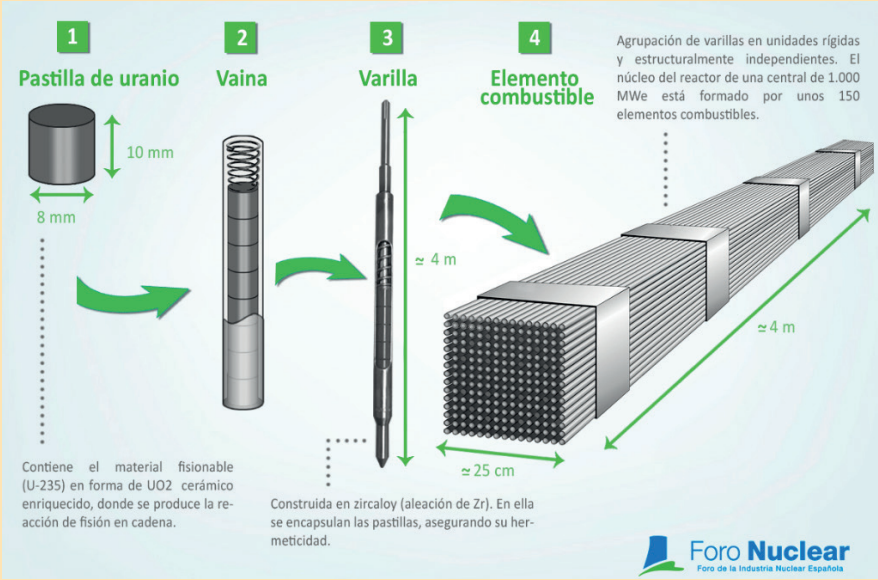


Figura S.6.3. Fabricación de un elemento combustible.

– **5ª etapa.** Uso del combustible en un reactor. Los elementos combustibles se introducen en la vasija del reactor nuclear y "se fisionan". El uranio-235 presente en los elementos combustibles sufre la reacción de fisión, dejando como desechos los productos de fisión. Una vez concluido el ciclo de utilización de un elemento de combustible en el reactor, este se almacena temporalmente en la propia instalación, en las piscinas de combustible irradiado. Y se deja ahí durante el tiempo suficiente para la desintegración de gran parte de los productos de fisión de vida corta, con la consiguiente reducción de los riesgos de exposición. Al disminuir la actividad (y, por tanto, el calor producido por la desintegración) se dice que el combustible está sometido a un proceso de "enfriamiento".

– **6ª etapa.** Reproceso de combustible irradiado. Aunque un elemento combustible haya terminado su periodo de utilidad en un reactor, no ha consumido más que una pequeña parte del uranio-235 que contenía y además uno de los productos de fisión que aparecen es el plutonio, elemento también fértil para producir reacciones de fisión. El reproceso es un conjunto de operaciones con objeto de recuperar los materiales fisionables presentes (uranio-235 y plutonio) separándolos del resto de productos de fisión y purificándolos para su empleo en la fabricación de nuevos elementos combustibles.

– **7ª etapa.** Almacenamiento de residuos. Durante todo el ciclo del combustible se producen residuos radiactivos que se han de gestionar como se explica más detalladamente en el capítulo 7 de este suplemento técnico.

Transporte

En España, el transporte de material radiactivo está regulado por un conjunto de normas que integran legislación nacional, europea e internacional, bajo la supervisión de varias autoridades, principalmente el CSN.

La regulación del transporte de material radiactivo se incluye dentro de las reglamentaciones que aplican a todas las mercancías peligrosas (Reglamento de Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR). El material radiactivo es una más de las nueve clases de mercancías peligrosas y se la identifica como clase siete (figura S.6.4).



Figura S.6.4. Normativa nacional. Transporte de material radiactivo.

La seguridad en el transporte se basa fundamentalmente en el diseño del embalaje.

Embalaje + contenido radiactivo = bulto radiactivo

Los requisitos de embalaje son más exigentes al aumentar el riesgo del contenido y las condiciones de transporte que deben soportar. Basándose en ello, los bultos radiactivos se clasifican en diversas categorías (bulto exceptuado, Industrial (IP), Tipo A, Tipo B(U), Tipo B(M) y Tipo C).

Los objetivos básicos de la seguridad en el transporte son: la contención de estos materiales dentro de los embalajes, el control de la radiación en el exterior del bulto, la prevención de la criticidad (para materiales fisionables) y evitar daños debidos al calor que puedan emitir ciertos bultos (combustible gastado).

El funcionamiento de las centrales nucleares

Las centrales nucleares utilizan el calor liberado por la fisión del combustible en un reactor nuclear para producir vapor que se inyecta en un turbogenerador y producir así energía eléctrica.

Se han hecho muchos diseños de reactores para mejorar su función como productores de energía eléctrica. El combustible o material de fisión es normalmente el uranio, que a veces se somete a un proceso de enriquecimiento para aumentar su contenido en el isótopo uranio-235 (isótopo fisionable). El combustible se emplea para producir la reacción en cadena por la que los neutrones liberados por una reacción de fisión desencadenan otra reacción similar y así sucesivamente.

La disposición del combustible es lo que se llama núcleo y se introduce en la vasija del reactor. El combustible debe protegerse de la evasión y corrosión que sufre durante el funcionamiento del reactor. Para ello se encapsula en vainas de metal de alta hermeticidad de diferentes tipos y formas, lo que además proporciona protección contra la dispersión de los productos de fisión. Estas vainas pueden ser de aluminio, acero inoxidable o *zircaloy* (aleaciones de zirconio). Además, en algunos tipos de reactores varias unidades de combustible se agrupan en elementos combustibles, que a su vez se distribuyen en función del tipo de reactor.

Los neutrones de fisión liberados en la reacción de fisión poseen gran energía, por lo que es necesario moderar su velocidad mediante choques elásticos con los átomos de otro material al que se llama moderador, que rodea a cada elemento combustible. Se pueden utilizar como moderadores materiales tales como el agua, agua pesada y grafito.

El número total de neutrones que inciden sobre el combustible debe estar controlado en el reactor para asegurar que la reacción prosiga a un ritmo constante. Esto se consigue mediante los elementos absorbentes de neutrones, o barras de control. Un reactor no puede estallar como una bomba atómica, porque esta carece de barras de control y de moderadores.

El calor generado por el reactor debe ser eliminado convenientemente, no solo para suministrar vapor a las turbinas, sino también para mantener el combustible a una temperatura adecuada. Para ello hay que añadir un refrigerante, que

puede ser un gas como, por ejemplo, el dióxido de carbono, CO_2 o un líquido como el agua. Cuando se utiliza agua, esta puede realizar dos funciones, la de moderador y la de refrigerante.

Figura S.6.5. Tipo de reactores, combustible, moderador y refrigerante.

Tipo de reactor	Combustible	Moderador	Refrigerante	Notas
Reactor de agua a presión (PWR)	U enriquecido	Agua ligera (H_2O)	Agua ligera (H_2O)	Circuito de agua secundaria para producir calor
Reactor de agua a ebullición (PWR)	U enriquecido	Agua ligera (H_2O)	Agua ligera (H_2O)	Se deja que el refrigerante hierva y produzca vapor
Reactor refrigerado por gas	U natural	Grafito	Dióxido de carbono $C0_2$	El $C0_2$ calienta un circuito de agua separado para producir vapor
Reactor avanzado refrigerado por gas (AGR)	U levemente enriquecido	Grafito	Dióxido de carbono $C0_2$	
Reactor de agua pesada CANDU	U natural	Agua pesada (D_2O)	Agua pesada (D_2O)	Trabaja como un reactor PWR
Reactor reproductor rápido (LBFBR)	U empobrecido + Pu (20%)	No tiene	Na fundido	Se utiliza para crear más material fisionable del que se consume

Cuando el reactor está en funcionamiento, el refrigerante queda también sellado en el interior de la vasija del reactor a presión, y el reactor en su conjunto opera dentro de un edificio sellado que se llama edificio de contención. De este modo se oponen diversas barreras a la fuga de productos de fisión (vaina del combustible, circuito de refrigeración del combustible y el edificio de contención).

Los principios físicos en que se basan todas las centrales nucleares son los mismos. Lo que las distingue es el tipo de combustible, moderador y refrigerante utilizado. En la figura S.6.5 se muestran varios ejemplos de reactores.

En la unidad 7 del nivel I y 6 del nivel II, hemos repasado el funcionamiento de las centrales nucleares operativas en España (centrales de agua a presión y de agua en ebullición), a continuación, vamos a ver otros tipos de reactores.

- CANDU, *Canada Deuterium Uranium* (Canadá deuterio uranio), puedes verlo en la figura S.6.6. Utilizan como moderador y refrigerante agua pesada (compuesta por dos átomos de deuterio y uno de oxígeno) y como combustible, utilizan uranio natural.

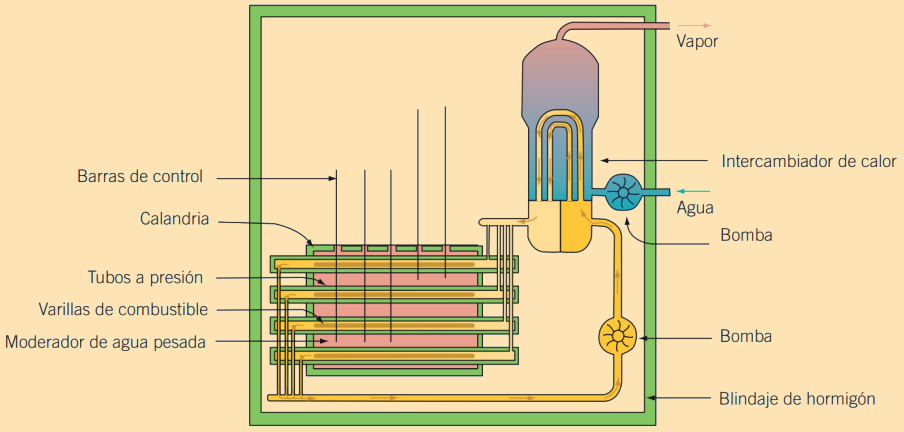


Figura S.6.6. Reactor CANDU, *Canada Deuterium Uranium*.

El moderador se sitúa dentro de un gran depósito, llamado calandria, atravesado horizontalmente por varios cientos de tubos a presión, que constituyen los canales para los elementos de combustible, refrigerados también por agua pesada y formando así el circuito primario de refrigeración. La alta presión dentro del depósito evita la ebullición del agua pesada.

Las barras de control penetran en la calandria verticalmente, y un sistema secundario de parada del reactor consiste en inyectar una solución de nitrato de gadolinio en el moderador. El moderador de agua pesada que circula a través del cuerpo de la calandria, también produce algún calor residual. Los canales que contienen sus elementos de combustible pueden abrirse individualmente, y cambiar los elementos de combustible sin hacer que el reactor deje de funcionar.

- LMFBR, *Fast Breeder Reactors* (reactores reproductores rápidos). Utilizan neutrones rápidos en lugar de térmicos para la reacción de la fisión por lo que no necesita moderador. Como combustible utiliza plutonio más uranio natural y como refrigerante del circuito primario sodio líquido. Está diseñado para producir combustible generando más material fisible del que consume. Hay de dos tipos, *Loop* y *Pool*. Rodeando el núcleo del reactor hay una capa de tubos que contienen uranio-238 no fisible, el cual al capturar neutrones rápidos procedentes de la reacción de fisión que se produce en el núcleo del reactor, se convierte parcialmente en plutonio-239 fisible. Entonces, este plutonio-239 puede ser utilizado para su uso posterior como combustible nuclear.

- AGR, *Advanced Gas-cooled Reactor* (reactor avanzado refrigerado por gas). Usa uranio levemente enriquecido como combustible. Como refrigerante utiliza CO_2 y como moderador grafito. Las barras de control penetran en el moderador de grafito, y existe un sistema secundario de parada del reactor que consiste en inyectar nitrógeno en el refrigerante. Existe un tercer sistema de parada del reactor que consiste en introducir bolas de boro en el reactor.

- RBMK, *Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny* (reactor de canales de alta potencia). Utiliza grafito como moderador, agua como refrigerante y uranio enriquecido como combustible. Puede recargarse en marcha. El reactor de Chernóbil era de este tipo y no disponía de la tercera barrera de seguridad, la contención.

- Existe en fase de experimentación el reactor ADS, *Accelerator Driven System* (sistema asistido por acelerador) y se prevé que una de sus funciones sea la eliminación de los residuos nucleares producidos en otros reactores de fisión mediante la transmutación, se transformarán isótopos de vida media larga en isótopos de vida media corta. El reactor es muy parecido a un reactor nuclear rápido que utiliza una masa subcrítica de torio, en la que se produce la fisión solo por la introducción, mediante un acelerador de partículas, de neutrones en el reactor.

- La próxima generación de reactores (llamados de IV generación) se basa en los actuales reactores a los que se les han incorporado los siguientes factores: estabilidad pasiva, simplificación, resistencia y robustez, facilidad de operación y modularidad. A modo de ejemplo, uno de estos reactores mejorados que sirven de base para las investigaciones es el modelo AP1000, que se podría considerar como de generación III+. El AP1000 es un reactor PWR con dos lazos de refrigeración. Las tuberías del circuito primario tienen menos soldaduras, el volumen del presionador es mayor, menor número de válvulas y tuberías, el núcleo va rodeado de un reflector radial de neutrones para reducir fugas.

  Los sistemas de seguridad utilizan sistemas de protección pasivos que aseguran la refrigeración continua del combustible y de los sistemas de contención en los casos de pérdida de la refrigeración normal. Los sistemas de seguridad pasivos se basan en la gravedad y en la recirculación natural. El AP1000 (Westinghouse) se fabrica de forma modular reduciendo el tiempo de construcción y por tanto los costes. En resumen, los reactores de generación IV están en fase de investigación y desarrollo, con algunos prototipos y demostradores en marcha. Estos diseños buscan mejorar la sostenibilidad, la seguridad y la eficiencia del combustible, utilizando tecnologías como reactores rápidos refrigerados por gas o metales líquidos, y ciclos de combustible cerrados.

- Los reactores modulares pequeños (SMR, por sus siglas en inglés) y los microrreactores (figura S.6.7) representan una evolución significativa en la tecnología nuclear, ofreciendo soluciones más flexibles, seguras y adaptables para la generación de energía.

  Los SMR son reactores nucleares con una potencia eléctrica inferior a 300 megavatios eléctricos (MWe), mientras que los microrreactores tienen una capacidad aún menor, generalmente por debajo de 10 MWe. Ambos tipos están diseñados para ser fabricados en serie en entornos controlados y luego transportados al sitio de operación, lo que reduce significativamente los

tiempos y costos de construcción en comparación con las centrales nucleares tradicionales.

Los microreactores nucleares son unas formas avanzadas y emergentes de los reactores modulares pequeños (SMR), en un formato compacto, transportable y fabricado en serie. Su tamaño reducido permite su instalación en lugares remotos, sin necesidad de una infraestructura eléctrica compleja, y su despliegue es más rápido y económico que el de las centrales nucleares convencionales. Incorporan sistemas de seguridad pasivos e inherentes, lo que mejora la fiabilidad y minimiza el riesgo de accidentes, incluso sin intervención humana. Además de producir electricidad, pueden emplearse para aplicaciones como la desalinización de agua, la calefacción urbana o el suministro de calor para procesos industriales. Son una solución ideal para comunidades aisladas, instalaciones militares, hospitales, centros de datos e incluso para apoyar a las energías renovables intermitentes como la solar o la eólica, garantizando un suministro energético estable.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) destaca su papel clave en la transición hacia una energía más limpia y resiliente, con más de 80 diseños de SMR en desarrollo en todo el mundo, incluyendo microrreactores. Países como Rusia, China, Argentina, Canadá y Estados Unidos ya han avanzado significativamente en esta tecnología. En Europa, la Comisión Europea ha fijado el objetivo de tener un minirreactor operativo en la próxima década.

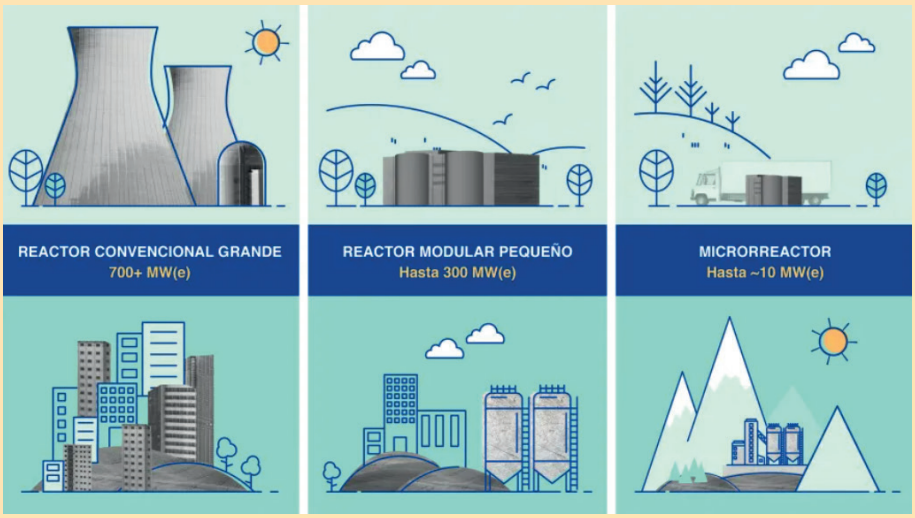


Figura S.6.7. Reactores convencionales, modulares pequeños y microrreactores.

En resumen, los SMR y microrreactores representan una prometedora alternativa en el panorama energético global, ofreciendo soluciones más adaptables y seguras para la generación de energía. Con el respaldo de organismos

internacionales y el compromiso de diversos países, estos reactores podrían desempeñar un papel crucial en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

El ITER

El ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) es una iniciativa científica internacional destinada a demostrar la viabilidad de la fusión nuclear como fuente de energía sostenible y prácticamente ilimitada. Consiste fundamentalmente en un experimento científico a gran escala que intenta demostrar que es posible producir de una forma comercial energía eléctrica procedente de la fusión nuclear.

La fusión nuclear es el proceso que alimenta al Sol y a las estrellas, donde núcleos ligeros se combinan para formar núcleos más pesados, liberando una enorme cantidad de energía en el proceso (figura S.6.8.). El combustible que se va a utilizar va a ser deuterio con tritio. La fusión entre un átomo de deuterio y un átomo de tritio producirá un átomo nuevo de helio, un neutrón y todo ello acompañado de un desprendimiento de energía. El núcleo de helio tiene una carga eléctrica que responda a la influencia de los campos magnéticos que dispone el Tokamak permaneciendo confinado dentro del plasma.

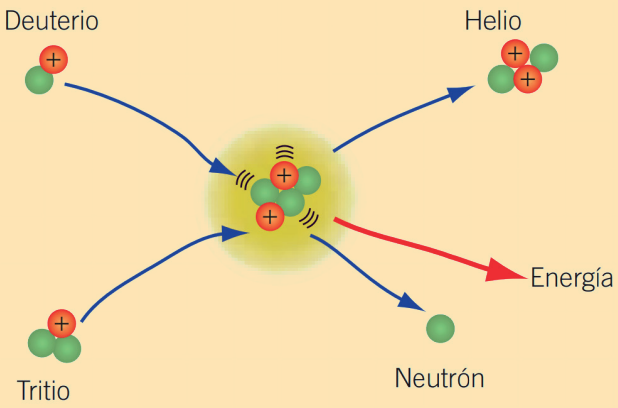


Figura S.6.8.
Reacción de fusión.

Sin embargo, el 80 % de la energía producida se escapa fuera del plasma debido a que los neutrones al no tener carga eléctrica no se ven afectados por los campos magnéticos. Estos neutrones serán absorbidos por las paredes que rodean al Tokamak transfiriendo así su energía en forma de calor. Este aumento de la temperatura de las paredes del Tokamak se dispersará mediante el uso de torres de refrigeración. En el diseño de una central de fusión este calor se utilizará para producir vapor que se enviará a una turbina que moverá un alternador que producirá electricidad.

Se pretende que del ITER (figura S.6.9) se obtengan 500 MW de potencia con solo un consumo de 50 MW de potencia, logrando así un factor de ganancia de energía Q, de al menos 10. Esto significa que se produce diez veces más energía de la que se consume para calentar el plasma. El ITER actualmente se encuentra en la fase final de construcción en Cadarache (Francia). Se prevé producir plasma en 2026-2027. Concebido para producir diez veces más energía de la necesaria para inducir la fusión, se basa en el modelo Tokamak (figura 2.6.10). Con una altura total de 30 m y una anchura de 40, la vasija del ITER, en forma de donut (toroide), tendrá un radio de 6,2 m y una capacidad de generación de 500 MW, el equivalente a la producción de una planta eléctrica de tamaño medio. El sistema de confinamiento magnético, fabricado con materiales superconductores, inducirá una corriente eléctrica en el plasma que permitirá mantenerlo en condiciones estables. El experimento estrella se prevé para la década de 2030 y será la fusión con deuterio y tritio. En este experimento se buscará alcanzar un Q ≥10, es decir, generar 10 veces más energía de la que se inyecta.

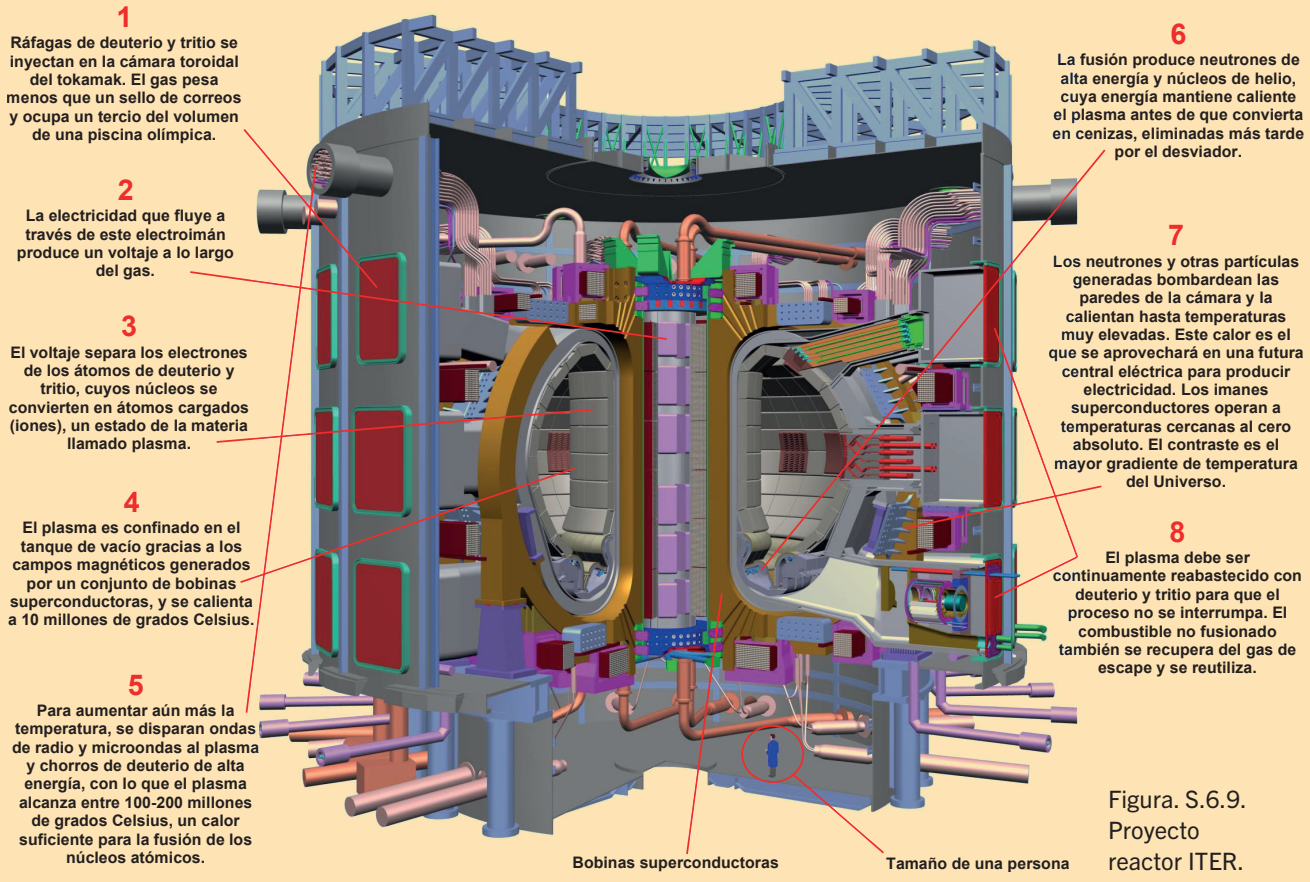


Figura. S.6.9. Proyecto reactor ITER.

Durante el tiempo de experimentación en ITER se probarán las tecnologías necesarias para el siguiente paso que será la construcción de una central de fusión en la que se produzca energía para su uso comercial.

7. OTRAS APLICACIONES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

La aplicación de las radiaciones ionizantes se basa en la interacción de la radiación con la materia y su comportamiento en ella. En cada colisión las radiaciones ionizantes ceden energía a la materia y esta sufre modificaciones al absorber dicha energía. Tenemos aplicaciones:

- Basadas en la acción de la materia sobre las radiaciones: la medida de la radiación transmitida o retrodispersada (figura S.7.1) nos da información sobre el material. Se incluyen aquí radiografía (gammagrafía), control de proceso (medida de niveles, espesores, densidad, gramaje, humedad...) o sondeos. Para este tipo de aplicaciones se utilizan generalmente fuentes encapsuladas de pequeña o mediana actividad. Se fundamentan en la diferente absorción o retrodispersión de la radiación por la materia que atraviesa la radiación.

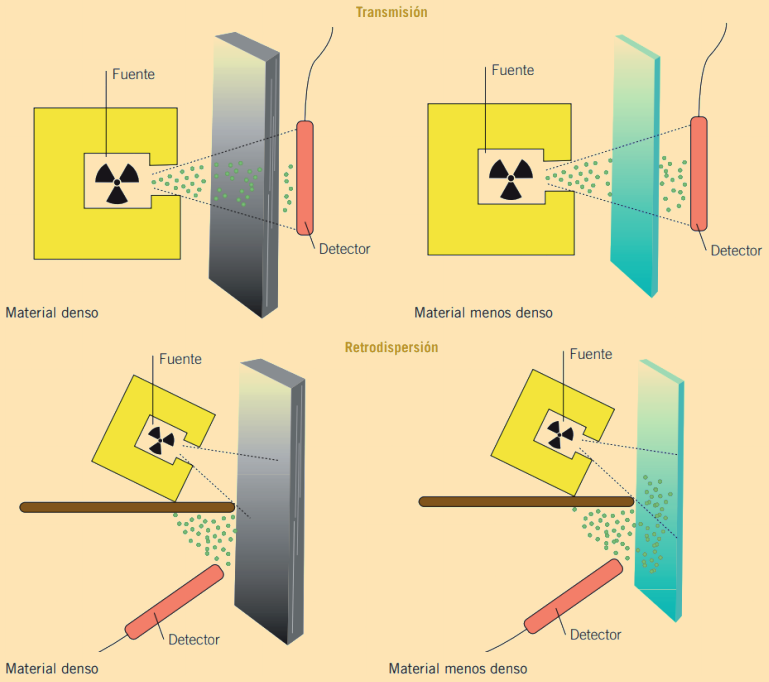


Figura S.7.1. Técnicas del uso de la radiación.

- Basadas en la acción de la radiación sobre la materia: tratamiento por irradiación: esterilización, conservación de alimentos, producción de polímeros. Se utilizan fuentes con elevada actividad.

- Basadas en su acción ionizante: detectores de humo o pararrayos. Se utilizan actividades muy bajas de emisores alfa y beta.

- Trazadores: utilización de isótopos radiactivos para el estudio del comportamiento de determinados materiales. La técnica consiste en incorporar radionucleidos a un material para seguir su curso o comportamiento mediante la detección de la radiación. Estas técnicas se encuentran ampliamente difundidas desde los estudios médicos y bioquímicos hasta en el estudio de transporte de fluidos y la contaminación ambiental.

A continuación (tabla S.7.1), se exponen algunas de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la industria, la agricultura y la investigación.

Tabla S.7.1. Radioisótopos, características y aplicaciones

Isótopo	Tipo de radiación	Periodo de semidesintegración	Aplicación
Cesio-137	β y γ	30 años	Control de procesos e irradiación: esterilización de materiales e irradiación de alimentos, medidas de densidad y humedad, espesores, gramajes
Cobalto-60	β y γ	5.26 años	Radiografía industrial, esterilización de materiales e irradiación de alimentos, control de procesos
Iridio-192	β y γ	74 días	Radiografía industrial
Americio-241/ Berilio	α, β, γ y neutrones	458 años/ 53.3 días	Medidas de humedad
Carbono-14	β	5730 años	Dataciones
Estroncio-90	β	25.5 años	Control de procesos y eliminación de electricidad estática
Hierro-55	γ	999 días	Técnicas analíticas
Cadmio-109	β	462 días	Técnicas analíticas
Níquel-63	β	125 años	Técnicas analíticas
Americio-241	α y γ	460 años	Detectores de humo, control de procesos y eliminación de electricidad estática

Sistemas radiactivos de control y medida

Control de procesos

Son equipos situados en línea de proceso de fabricación. La radiación al interaccionar con la materia experimenta fenómenos de absorción y dispersión que suponen la pérdida total o parcial de su energía. La medida en un detector de la radiación transmitida o retrodispersada nos proporciona información sobre el material en el que se produce la interacción. Esta información nos será útil para controlar una variable de interés en el proceso productivo.

El detector va asociado a una cadena electrónica que genera las señales necesarias de indicación, ajuste o parada del proceso. Estos sistemas pueden instalarse en la línea de proceso para medida en continuo de nivel, densidad, espesor, gramaje o análisis de materiales.

Se utilizan en gran variedad de industrias, como: embotelladoras (figura S.7.2), acerías, cementeras, fábricas de plásticos, de papel, de productos textiles, tabacaleras, petroquímicas, madereras o centrales térmicas.

La radiación gamma es la más utilizada en el control de la fabricación de láminas metálicas, debido a su alto poder de penetración. La radiación beta, con menor poder de penetración, es habitual en la industria del papel y el plástico.

La determinación de humedad mediante la utilización de fuentes radiactivas se basa en la moderación de neutrones rápidos al chocar con los átomos del agua. Se utiliza esta técnica para la fabricación de cementos, vidrio u hormigón.

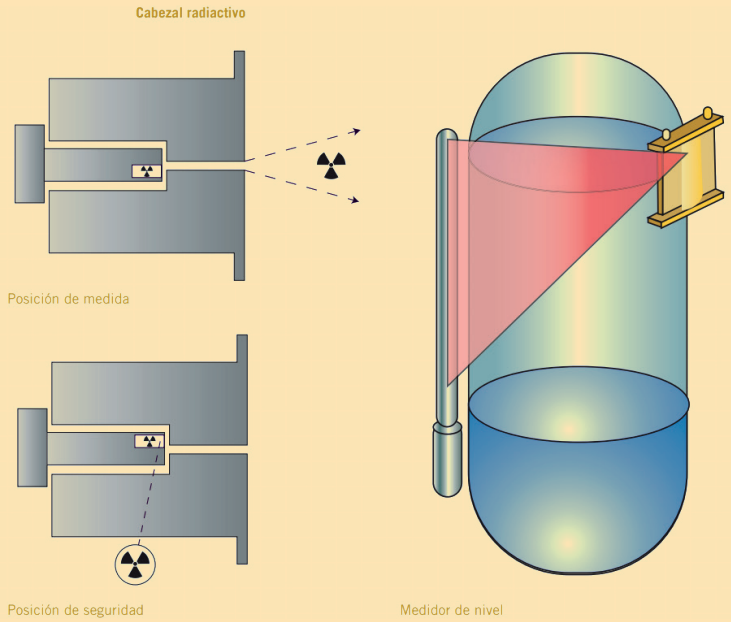


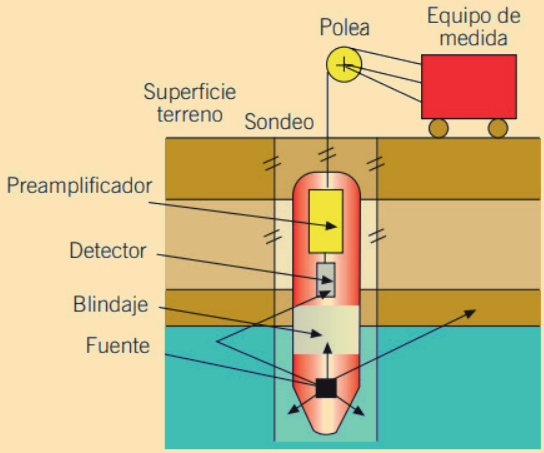
Figura S.7.2. Esquema equipo de medida de nivel de llenado.

Sondeos y obra civil

Se utilizan *in situ*, en la propia obra. En la realización de obras públicas es fundamental la determinación de la densidad y de la humedad del suelo, y una buena opción para realizar esas determinaciones se basa en el empleo de fuentes radiactivas. De ahí que su uso esté ampliamente difundido.



Medidor de densidad y humedad en suelos en superficie



Sondas radiactivas

Figura S.7.3. Equipos de prospección geológica mediante radiación.

En la compactación de suelos por apisonado se requiere que la densidad obtenida sobrepase un determinado valor y que la humedad se encuentre dentro de ciertos valores normalizados.

Aunque el fundamento de la medición de la densidad es distinto de la medida de humedad, como ambas mediciones son necesarias, se han diseñado equipos que incorporan en un solo instrumento ambas mediciones, cada una con su propia técnica, figura S.7.3.

Para medir la densidad del terreno se utiliza una fuente gamma como el cesio-137, y se mide en el detector qué cantidad de radiación llega tras atravesar el terreno. En cuanto a la medida de la humedad se utiliza una fuente emisora de neutrones, que suele ser una fuente de americio-241/Be. Estos neutrones se termalizan (reducen su energía) al interaccionar con átomos de hidrógeno del agua y mediante la retrodispersión se puede medir dicha interacción.

Se emplean las sondas radiactivas para determinar las características de las rocas en sondeos de prospección geológica. En este caso las fuentes radiactivas no van incorporadas en un equipo, y la actividad de las fuentes suele ser mayor que en los equipos utilizados en obra civil.

También se aplica el uso de sondas de neutrones en el campo de la agricultura, con objeto de determinar la humedad de un terreno estableciendo así la cantidad de agua que le falta o le sobra para obtener una cosecha óptima, ahorrando con ello gran cantidad de agua.

Análisis de muestras

Las técnicas a utilizar para analizar una muestra pueden ser: fluorescencia de los rayos X, difracción de rayos X o por activación neutrónica. Se utilizan habitualmente en laboratorios.

- La espectrometría por fluorescencia de rayos X es la técnica utilizada normalmente cuando se quiere conocer con rapidez la composición elemental exacta de una sustancia. En el análisis por espectroscopia de fluorescencia de rayos X, los átomos presentes en la muestra analizada son excitados de modo que los electrones de las capas internas son arrancados o promocionados a niveles de energía superiores. Los electrones de otras capas ocupan los huecos electrónicos que quedan libres, de modo que la energía asociada a dichas transiciones se reemite en forma de fotones.

- A estas emisiones se las conoce como emisiones de fluorescencia o radiación secundaria y presentan unas energías características del átomo que las genera y una intensidad que depende directamente de la concentración de dicho átomo en la muestra.

- En la técnica de difracción de rayos X, se hace pasar un haz de rayos X a través de un cristal y se miden las direcciones en que se han difractado los rayos X debido a su choque con la estructura cristalina, permitiéndose conocer así dicha estructura.

- El análisis por activación neutrónica es una técnica que permite efectuar un análisis de muchos elementos de diferentes tipos de muestras, por ejemplo:

biológicas, mineralógicas, metalúrgicas, médicas y otras. Esta técnica se basa en la interacción entre un neutrón y el núcleo de un átomo. El resultado es un núcleo radiactivo que generalmente emite una radiación gamma, el estudio de esta radiación gamma permite identificar los elementos presentes en una muestra desconocida y cuantificarlos, el nivel de cuantificación es del orden de las partes por billón. La fuente isotópica de neutrones suele ser de californio-252 o de americio-241/berilio y la actividad de 20-30 curios.

Radiografía industrial

La radiografía industrial se utiliza en técnicas de ensayos no destructivos. Los ensayos no destructivos consisten en ciertas pruebas que se realizan a piezas, objetos o componentes con el fin de verificar la calidad o el estado de los mismos, sin dañarlos o inutilizarlos como consecuencia del ensayo. En general, los ensayos no destructivos sirven para medir, caracterizar y poner de manifiesto discontinuidades superficiales e internas en los materiales.

Para realizar estos ensayos con radiaciones ionizantes se pueden utilizar equipos de rayos X, aceleradores o equipos que emiten radiación gamma (técnica que se conoce como gammagrafía industrial). Mediante estos ensayos se obtienen imágenes fotográficas donde aparecen los defectos que puedan existir en el objeto examinado (figura S.7.4).

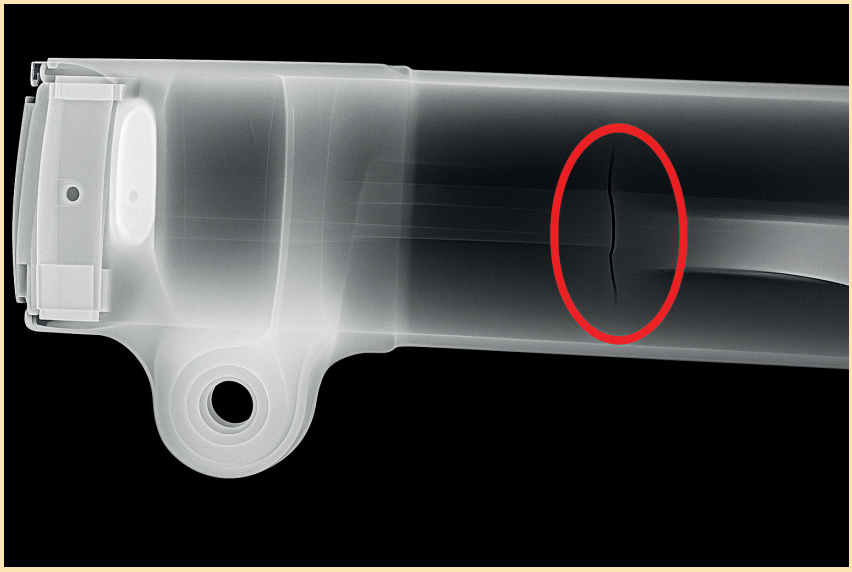


Figura S.7.4.
Grieta en una pieza observada en una radiografía.

Estas radiaciones ionizantes pueden atravesar objetos opacos a la luz, y la radiación incidente es atenuada en mayor o menor proporción según la naturaleza y espesor de los materiales atravesados, de forma que la radiación que emerge del objeto impresiona una emulsión fotográfica.

Los rayos X, del mismo tipo que los utilizados para el diagnóstico médico, son adecuados cuando las piezas son poco gruesas, pero pueden producir rayos X de mayor energía por medio de aceleradores y de equipos específicos. Cuando el metal tiene más grosor se requieren fuentes de rayos gamma similares a las utilizadas para la radioterapia, cuyo poder de penetración es mayor.

Se utilizan técnicas de radiografía industrial, dentro del campo de los ensayos no destructivos, para buscar defectos en trabajos de soldadura y en las piezas de metal empleadas en la construcción de barcos, puentes, aviones, recipientes de presión, líneas de tuberías y otras estructuras en las que una rotura podría resultar muy peligrosa.

Irradiación de materiales

Las radiaciones ionizantes tienen la propiedad de inhibir la reproducción celular y con ello causar la muerte de microorganismos e insectos. En esta propiedad biocida de las radiaciones ionizantes se basa la esterilización de productos médicos y farmacéuticos que requieren un alto grado de asepsia como son prótesis, válvulas, materiales de cura, materiales de operación, materiales farmacéuticos. Para conseguir esta esterilización se puede utilizar:

- Fuentes emisoras: radioisótopos de alta energía (cobalto-60 y cesio-137) (figura S.7.5).

- Aceleradores de electrones, de alta energía.

Por otro lado, se puede actuar en el control de plagas de insectos que pueden provocar enfermedades o destruir cultivos mediante la suelta, en las áreas afectadas, de grandes cantidades de machos criados en laboratorios y esterilizados con radiaciones ionizantes. Se la denomina “Técnica de los Insectos Estériles (TIE)”.

La radiación gamma también se utiliza para el tratamiento de alimentos y mejorar su conservación. Estos alimentos irradiados no se convierten en radiactivos, de modo que el consumidor no está expuesto a ninguna radiación. En este caso la irradiación viene de una fuente exterior al alimento de tal manera que no existe contaminación del mismo con material radiactivo. Los alimentos se pueden consumir con seguridad porque se eliminan de ellos microorganismos como la salmonella, campylobacter, listeria, etc.

Con esta técnica también se retrasa la germinación de las patatas y otros tubérculos, como las cebollas y los ajos y se usa, asimismo para alargar el periodo de conservación de los alimentos. El proceso consiste en exponer los alimentos a irradiación generalmente con rayos gamma, empleando tres niveles de dosis dependiendo del fin perseguido. A dosis bajas para inhibir la germinación (por ejemplo, de las patatas), la desinsectación y el retraso en la maduración. A dosis medias para prolongar el tiempo de conservación reduciendo la carga microbiana y a dosis altas para la esterilización incluida la eliminación de virus.

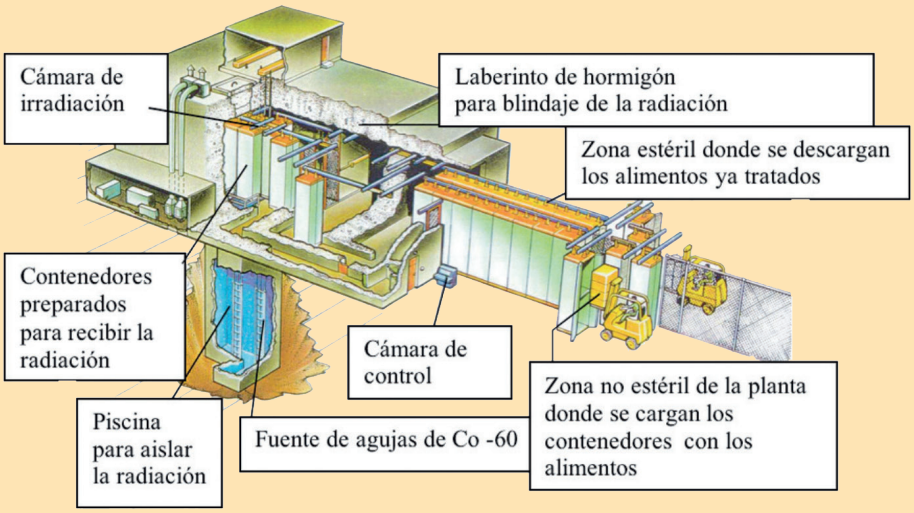


Figura S.7.5. Irradiador de alimentos.

Finalidad	Productos
Dosis baja (hasta 1 kGy)	
Inhibición de brotes	Patatas, cebollas y ajos
Desinfección de insectos y parásitos	Cereales, legumbres, frutas frescas y desecadas, carne y pescado desecado
Retardo de la maduración	Frutas y verduras frescas
Dosis media (1-10 kGy)	
Prolongación del periodo de conservación	Pescado fresco, fresas
Eliminación de la putrefacción y de los microorganismos patógenos	Mariscos frescos y congelados, aves y carne
Mejora de las cualidades de los alimentos	Aumento del jugo en las uvas, reducción de tiempo de cocción en verdura deshidratada
Dosis alta (hasta 10-50 kGy)	
Esterilización	Carnes, aves, mariscos, alimentos preparados, dietas hospitalarias

Con esta técnica también se pueden desarrollar variedades de cultivo con propiedades ventajosas para la agricultura mediante la inducción de mutaciones para obtener plantas más resistentes. Además, se puede modificar el tiempo de maduración para obtener plantas de maduración más tardía o temprana, aumentar en la resistencia a enfermedades evitando de esta manera la utilización de productos químicos contra plagas, aumentar de rendimientos de cultivos, mejorar las características de las semillas como aumento del valor nutritivo o la facilidad de cocción, etc.

Asimismo, al irradiar ciertos materiales se pueden producir reacciones que den lugar a la obtención de nuevos productos o a cambiar las propiedades del producto irradiado. De esta forma se pueden obtener ciertos plásticos. Se usan estas técnicas para el aislamiento de cables, la fabricación de chalecos salvavidas y amortiguadores de golpes, maderas de alta dureza, materiales superabsorbentes o resistentes a la abrasión.

Mediante aceleradores de electrones e irradiadores se consigue la curación y *crosslink* (reticulación) de materiales plásticos. Los materiales plásticos están formados básicamente por polímeros orgánicos. Las radiaciones ionizantes forman radicales libres en las cadenas de polímeros del material que inducen el crecimiento lineal de las cadenas, así como la formación de puentes o enlaces entre ellas (reticulación). Los plásticos se vuelven más duraderos, fuertes y resistentes al fuego (recubrimientos de cables). Algunos materiales que se están creando para uso en el espacio requieren unas propiedades que solo se pueden fabricar con la ayuda de gamma/haz de electrones.

Trazadores

El radiotrazador es un isótopo que se incorpora a un sistema para seguir su comportamiento mediante su detección. El trazador ideal es aquel que es idéntico a algún componente del sistema investigado y es posible su medida sin ambigüedad y con gran sensibilidad, y no provoca interferencias en el proceso en estudio.

Se utiliza, por ejemplo:

- En el estudio de dispersión de efluentes industriales.
- Localización de fugas.
- Investigación de flujo de aguas superficiales y subterráneas.
- Evaluación de reservas petrolíferas.

Detección de fugas

Se utilizan radionucleidos de periodo muy corto, que se mezclan con el fluido y se introducen en las canalizaciones. La situación de la fuga se establece utilizando detectores capaces de localizar el radionucleido cuando este sale de la canalización por alguna rotura.

Investigación en biología

Gran parte de nuestros conocimientos actuales en el terreno de la biología se deben al uso de "etiquetas" de átomos radiactivos que pueden introducirse en moléculas como el ADN y así seguir la función que desempeña la molécula en la vida.

Un gran número de análisis bioquímicos, requieren la detección de cantidades diminutas de material. Ahora bien, las pruebas químicas, rara vez son sensibles a cantidades menores de 10^{-7} moles. Esta limitación se ha paliado por el desarrollo de una tecnología de marcadores radiactivos, cuya extraordinaria sensibilidad ha permitido que los estudios con sustancias en cantidades del orden de 10^{-12} moles, sean pura rutina.

Un compuesto marcado es un tipo de molécula en la que uno o más de sus átomos estables (en la molécula original) se han sustituido por sus correspondientes radioisótopos. Por ello, conforme a lo indicado anteriormente, esta molécula tiende a alcanzar el grado de mayor estabilidad energética mediante desintegraciones nucleares, emitiendo partículas y/o energía.

De esta forma la molécula marcada "trazador radiactivo" es fácilmente detectable por diferentes técnicas (autorradiografía, contaje de centelleo, etc.) en función del campo de radiación que producen el o los radioisótopos que la componen, tabla S.7.2.

El procedimiento químico para introducir un isótopo radiactivo en una molécula se llama "marcaje radiactivo". El éxito en la aplicación de un compuesto marcado como trazador en investigación depende fundamentalmente de la elección del radioisótopo. Como las moléculas biológicas están construidas principalmente por C, H, O, N, P y S es lógico que se elijan los radioisótopos siguientes: carbono-14, hidrógeno-3, fósforo-32 y fósforo-33.

También se utilizan yodo-125 y yodo-131 para el marcaje de determinadas proteínas. Otros radioisótopos utilizados son calcio-45, cromo-51 y rubidio-86. El uso a que se destina cada isótopo radiactivo depende del estudio que se esté desarrollando en cada momento. La siguiente tabla refleja las características fundamentales de los radionucleidos (isótopos radiactivos) más utilizados en investigación biológica.

El objetivo de las diferentes aplicaciones de las radiaciones ionizantes en investigación es el estudio de los diferentes procesos biológicos que tienen lugar en los seres vivos. Estas aplicaciones se pueden abordar de dos maneras diferentes, mediante ensayos in vivo o bien mediante ensayos *in vitro*.

Tabla S.7.2. Radionucleidos y características principales utilizados en investigación

Radionucleido	Tipo de radiación	Periodo de semidesintegración
Tritio-3	β	12.3 años
Carbono-14	β	5730 años
Azufre-35	β	87 días
Calcio-45	β	165 días
Fósforo-32	β	14.7 días
Fósforo-33	β	21 días
Rubidio-86	β/γ	18.7 días
Yodo-131	β/γ	8 días
Yodo-125	γ	60 días

También se utilizan los radiotrazadores en el campo de la agricultura, como por ejemplo en estudios de alimentación agrícola, eficacia de fertilizantes, absorción por las plantas y grado de biodegradación de insecticidas, así como en estudios relacionados con abastecimiento de aguas, intercomunicación de acuíferos, pérdidas de agua en pantanos, etc.

Por ejemplo, se puede determinar la eficacia en la absorción de los abonos por las plantas y optimizar la fijación biológica del nitrógeno. El empleo de los fertilizantes es costoso y su uso inadecuado o excesivo puede ser perjudicial para el medio ambiente. Marcando los abonos con isótopos de fósforo y de nitrógeno se puede determinar con precisión la cantidad que absorbe la planta y la que se pierde. Asimismo, estas técnicas permiten conocer la cantidad de nitrógeno que pueden fijar las plantas y estudiar la forma de mejorar su absorción.

Otras aplicaciones posibles son en el campo de la zootecnia. Se llevan a cabo estudios con radioisótopos para determinar el valor nutritivo y la absorción de los piensos y otros subproductos de diversas industrias que habitualmente sirven de alimento al ganado, de manera que el rendimiento de la producción lechera y ganadera ha aumentado.

Otros usos

Equipos usados en sistemas de seguridad

Son equipos de rayos X que se utilizan para inspeccionar bultos y detectar elementos potencialmente peligrosos, sin necesidad de abrirlos. La información recogida es procesada, almacenada y digitalizada y se proyecta en imagen en monitores de televisión. Su uso está muy extendido y se encuentran instalados en aeropuertos, aduanas o edificios oficiales.

Tenemos sistemas de inspección de grandes contenedores, como los que se emplean en puertos para inspeccionar los contenedores que transportan los camiones (figura S.7.6), para lo que usan un acelerador de electrones entre 3 y 6 MeV, o equipos de rayos X para inspección de bultos en aeropuertos, que utilizan equipos de rayos X que incorporan uno o varios tubos y que incluso pueden llegar a hacer tomografía.



Figura S.7.6.
Pórtico de detección de camiones.

Detectores de humo

Son dispositivos usados en sistemas de protección contraincendios (figura S.7.7). Su diseño incorpora una cámara de ionización, una fuente radiactiva (Americio-241, < 37 kBq) y una carcasa envolvente del conjunto. La fuente radiactiva ioniza el aire de la cámara y produce una débil corriente eléctrica.

Las partículas de humo que penetran en la celda, captan los electrones y reducen o interrumpen esa corriente de iones, lo que desencadena una señal de

alarma. Se instalan en fábricas, locales comerciales, oficinas, hoteles. Actualmente están siendo sustituidos por detectores de humo basados en técnicas no radiactivas, ópticos, por ejemplo.



Figura S.7.7.
Detector de humo iónico.

Eliminación de electricidad estática

Es una aplicación basada en la acción ionizante de la radiación. Se ioniza el aire mediante fuentes radiactivas emisoras de partículas alfa. Las fuentes utilizadas son polonio-210 y americio-241 con actividades muy bajas. La eliminación de la electricidad estática es de gran utilidad en aquellos casos en los que su acumulación provoca inconvenientes en los procesos industriales: industria textil, de materiales plásticos, de papel o vidrio. Asimismo, es de utilidad en aquellas industrias en las que se utilizan grandes volúmenes de material inflamable y en aquellas en las que pueden provocarse explosiones por salto de chispa eléctrica.

Datación por carbono

A lo largo de miles de años la relación entre el carbono estable y el carbono-14 se ha mantenido inalterada en estado de equilibrio en la atmósfera. Esta misma relación se mantiene en todos los seres vivos. Cuando estos mueren, el equilibrio se rompe debido a la desintegración radiactiva del carbono-14 y analizando la cantidad de carbono radiactivo presente en el resto orgánico que se quiera datar, podrá deducirse su antigüedad. Esta técnica se utiliza en investigación para datar restos orgánicos.

Transporte

Las diversas aplicaciones del material radiactivo, mencionadas anteriormente, dan lugar a una serie de transportes desde su lugar de origen al punto de uso o a las dependencias del comercializador (figura S.7.8). Las fuentes radiactivas fuera de uso son transportadas de nuevo, para su gestión, como residuo radiactivo o bien se devuelven a su lugar de origen (fabricante).

La regulación del transporte de material radiactivo se incluye dentro de las reglamentaciones que aplican a todas las mercancías peligrosas. El material radiactivo es una de las nueve clases de mercancías peligrosas y se la identifica como clase siete.



Figura S.7.8.
Transporte de material radiactivo.

La seguridad en el transporte descansa en el diseño del embalaje (figura S.7.9).

Embalaje + contenido radiactivo = bulto radiactivo



Figura S.7.9.
Bulto radiactivo.

Los requisitos de embalaje son más exigentes al aumentar el riesgo del contenido y las condiciones de transporte que deben soportar. Basándose en ello, los bultos radiactivos se clasifican en diversas categorías.

Los equipos para medida de densidad y humedad en suelos son transportados a las obras para su utilización en campo. Por ello, estos equipos son transportados dentro de su maleta y constituyen un bulto de tipo A. Por otra parte, los equipos de gammagrafía industrial utilizados también en campo se transportan en bulto de tipo B.

Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes se emplean a diario en medicina como consecuencia de dos de sus propiedades principales:

- En **diagnóstico**, por su capacidad de penetración a través de los tejidos, atenuándose o depositándose diferencialmente en los mismos en función de su densidad. Permite la formación de imágenes, estáticas y dinámicas, la aportación de información del interior del cuerpo y del funcionamiento de órganos y sistemas.

- En **terapia**, por la posibilidad de depositar gran cantidad de energía en zonas elegidas del cuerpo para conseguir un efecto terapéutico sobre ellas.

Podemos distinguir tres grandes áreas médicas o especialidades en que se emplean:

- Radiodiagnóstico

El radiodiagnóstico comprende las técnicas de obtención de imágenes, estáticas o dinámicas, cuya información es fundamentalmente morfológica y anatómica, y se basa en el registro del contraste de las densidades correspondientes a los tejidos cuando son atravesados por haces de rayos X. También en algunas intervenciones quirúrgicas y en otras técnicas no invasivas las imágenes de rayos X sirven de ayuda para realizar diferentes procedimientos

Los rayos X son producidos de forma artificial, aplicando una diferencia de potencial determinada en un tubo de vacío, dentro del cual un filamento incandescente emite electrones, que son acelerados y se hacen chocar con un material, generando los rayos X (figura S.7.10).

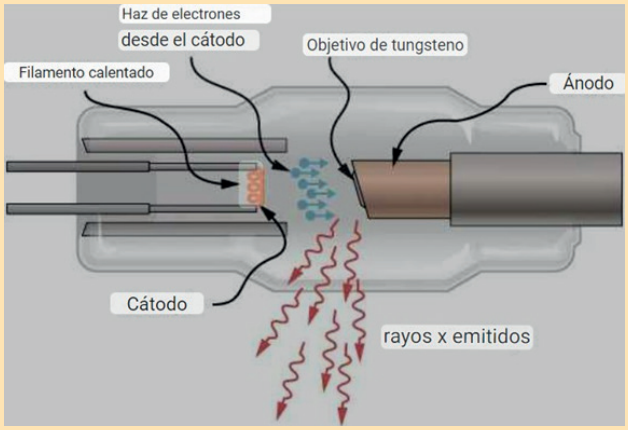


Figura S.7.10.
Esquema de producción de rayos X.

Cuanto mayor es la diferencia de potencial aplicada (puede variar desde 25 kV para una mamografía hasta unos 150 kV), mayor es la energía de los rayos X y mayor es su penetración en el cuerpo.

Las imágenes radiográficas se obtienen mediante la interposición de la parte del cuerpo a visualizar, entre la salida del tubo de rayos X y un sistema de detección de radiación, que actualmente suele ser un detector digital, si bien antiguamente eran películas radiográficas o fósforos fotoestimulables que necesitaban un proceso de revelado o lectura posterior.

La diferente atenuación que sufren los rayos X por las distintas densidades del cuerpo humano hace que se registre una imagen en la que las partes más densas, como los huesos, aparecen más claras dentro de una escala de grises, mientras las partes menos densas, como por ejemplo un pulmón, dejan pasar más radiación y aparecen más oscuras.

La aplicación de la informática al diagnóstico médico, dando lugar al nacimiento de la radiología digital, ha permitido mejorar la obtención, el almacenamiento a través de los llamados PACS (*Picture Archiving and Communication Systems*) y el tratamiento de la imagen, permitiendo procesados o ajustes posteriores según las necesidades clínicas. Hace también posible la transmisión de las imágenes digitales a distancia y su integración con el resto de información clínica de los pacientes.

Existen distintas tipologías o aplicaciones concretas de equipos de rayos X que se repasan a continuación. La cantidad de radiación que se recibe como paciente por cada una de ellas es muy variable, oscilando entre unas centésimas de mSv en una prueba convencional y unos mSv en una prueba de TC.

- Radiografía convencional

Son las pruebas más sencillas de diagnóstico, obtenidas en equipos formados por un tubo enfrentado a un detector plano, situado bien en una mesa para proyecciones de los pacientes tumbados en la misma, o bien en un dispositivo de pared para proyecciones con el paciente en pie. En ambas situaciones se obtienen imágenes proyectadas de las estructuras anatómicas superpuestas del interior del cuerpo. Ejemplo de ellas son las imágenes de tórax o imágenes traumatológicas para visualizar fracturas de los huesos.

- Escáner-TC

En la llamada tomografía computarizada (TC o escáner-TC), en lugar de obtener una imagen de proyección como en la radiografía convencional, se hace rotar el tubo de rayos X alrededor del paciente mientras emite un haz en forma de abanico, al tiempo que se hace avanzar la mesa sobre la que se coloca el paciente. Al tiempo, un conjunto de detectores enfrentados al tubo de rayos X que se mueven solidarios con él, recogen la señal de rayos X atenuada.

Mediante el tratamiento informático de estas señales, se obtienen imágenes de cortes transversales del cuerpo humano, o en cualquier otra orientación, e incluso reconstrucciones en tres dimensiones de las estructuras anatómicas en estudio (figura S.7.11). Esto evita la superposición de estructuras anatómicas en la imagen, produciendo un diagnóstico más preciso.



Figura S.7.11. Equipo de tomografía computarizada y tipo de imágenes producidas.

Radiología dental

Por un lado existen las radiografías intraorales, para detectar caries interproximales o problemas en las raíces de los dientes. Se realizan normalmente, en piezas dentales individuales, introduciendo un pequeño detector de radiación en el interior de la boca.

Otra variedad son las radiografías dentales extraorales, donde se puede mostrar la totalidad de la estructura facial y mandibular, mediante equipos más complejos que realizan proyecciones bien planas (cefalometrías o telerradiografías) o envolventes (ortopantomografía o radiografía dental panorámica, útil para planificar una ortodoncia, figura S.7.12).

También existe el TC Dental (*cone beam* dental), en el que con un haz ancho se toman numerosas proyecciones desde diferentes ángulos con las que se puede reconstruir una imagen por cortes o en tres dimensiones de la cavidad oral muy detallada.



Figura S.7.12. Radiografía dental panorámica.

Mamografía

La mamografía es una imagen de la mama obtenida con rayos X de energías adecuadas (entre 25 y 35 keV), para poder obtener contraste y distinguir los diferentes tejidos mamarios.

Los modernos equipos de mamografía incluyen técnicas de tomosíntesis en las que, realizando unas pocas proyecciones, es posible obtener imágenes reconstruidas en diferentes planos con objeto de evitar superposición de estructuras en la imagen y conseguir una mejor localización de las patologías.

Fluoroscopia

Esta técnica emplea radiación de menor intensidad, pero de manera continua o pulsada. La señal captada por los detectores se transforma en una imagen dinámica mostrada en tiempo real en un monitor, con gran utilidad en procedimientos guiados por la imagen (reducción de fracturas, colocación de prótesis y sondas), intervenciones quirúrgicas o visualización de estructuras vasculares mediante la administración de contrastes.

Radiología Intervencionista

Consiste en la realización de procedimientos mínimamente invasivos para diagnóstico o tratamiento de diversas patologías (principalmente en radiología vascular o hemodinámica). Evita la realización de prácticas quirúrgicas, con el riesgo, dolor y tiempo de hospitalización que conllevan (no se requiere anestesia general e implica una convalecencia menor).

Con la ayuda de una guía con un diámetro de entre uno y dos milímetros, se introducen catéteres en los vasos sanguíneos u otras vías para guiarlos, mediante la imagen dinámica de rayos X en tiempo real o series de radiografías visualizadas en modo cine, hasta la zona de localización de la patología para así poder aplicar alguna técnica terapéutica (figura S.7.13).



Medicina Nuclear

Podemos distinguir dos tipos de práctica según la intención: el diagnóstico o la terapia de enfermedades.

Medicina nuclear diagnóstica

La medicina nuclear diagnóstica utiliza la distinta captación y distribución en órganos y tejidos de diversas sustancias, "marcadas" con isótopos radioactivos y administradas al paciente (llamadas también radiotrazadores), para generar imagen o información funcional o metabólica mediante la detección de la radiación que se emite desde esas zonas de captación del interior del cuerpo.

El radiotrazador, preferentemente de vida corta (el más habitual es el tecnecio-99m), y en actividades muy bajas que son suficientes para ser detectadas, se administra habitualmente por vía intravenosa. Tras un periodo que oscila entre algunos minutos y varias horas, en el que se acumula en un tejido, órgano o sistema determinado, se detecta la señal que produce la radiación gamma dentro del cuerpo desde el exterior, con equipos como gammacámaras, SPECT o PET, proporcionando la información buscada.

El trazador acaba siendo excretado del cuerpo del paciente, generalmente a través de la orina. Se emplea en el diagnóstico oncológico, enfermedades neurológicas, pulmonares, cardiacas y renales, entre otras muchas.

Una gammacámara planar es el equipo más básico. Consta de un cristal detector y tubos fotomultiplicadores, más la electrónica asociada para formar la imagen a partir de la señal detectada en cada posición. A ellos se añade un colimador para garantizar que la imagen proyectada es reflejo fiel de la distribución del trazador en los tejidos del paciente, obteniéndose imágenes en dos dimensiones.

El SPECT (Tomografía computarizada por emisión de fotón único) tiene la misma base de funcionamiento, pero el sistema de detector y colimador va girando alrededor del paciente, obteniendo sucesivas imágenes planares para finalmente permitir la obtención de una reconstrucción tridimensional o en cortes de las zonas de captación.

El PET (Tomografía por Emisión de Positrones) emplea radiofármacos marcados con isótopos emisores de positrones (electrones con carga positiva) en lugar de emisores gamma; el más habitual el flúor-18, cuyo periodo de semidesintegración es de unos 110 minutos, combinado en forma de fluorodesoxiglucosa FDG.

Cada positrón emitido por flúor-18 en el interior del paciente al interactuar mediante la reacción de aniquilación con un electrón del cuerpo, da lugar a

la emisión de dos fotones de igual energía, emitidos al mismo tiempo, en igual dirección y sentido opuesto, que, al salir del organismo, podrán ser detectados por el PET, consistente en una gran cantidad de pequeños detectores de estado sólido ubicados en forma de anillo en torno a la camilla sobre la que reposa el paciente. Si dos detectores enfrentados registran simultáneamente dos eventos, esa señal se cuantifica como indicativa de la situación de un positrón emitido. Aparece un ejemplo de dispositivo detector PET en la figura S.7.14.



Figura S.7.14. Dispositivo de imagen PET-TC.

Permite cuantificar diferentes procesos bioquímicos y fisiológicos, como el metabolismo energético, la multiplicación de las células y la tasa de consumo de oxígeno, y también reconstruir la captación en forma de imágenes en cortes tomográficos en diferentes orientaciones, y eventualmente imágenes tridimensionales. En oncología es una herramienta prácticamente insustituible: como los tejidos tumorales consumen más glucosa, se pueden identificar lesiones, observar el estado en el que se encuentra el tumor en un solo estudio o localizar recurrencias.

Una mejora importante en la calidad diagnóstica se ha conseguido con la construcción de equipos híbridos (SPECT-CT, PET-CT), donde se utilizan los datos de atenuación obtenidos del registro del TC para realizar la corrección del efecto producido por las estructuras de mayor densidad presentes en el interior del cuerpo que atenúan en ciertas zonas la emisión del isótopo captado. Adicionalmente se pueden obtener imágenes funcionales y anatómicas fusionadas, procedentes de ambos modos de detección, como se pueden ver en la figura S.7.15.

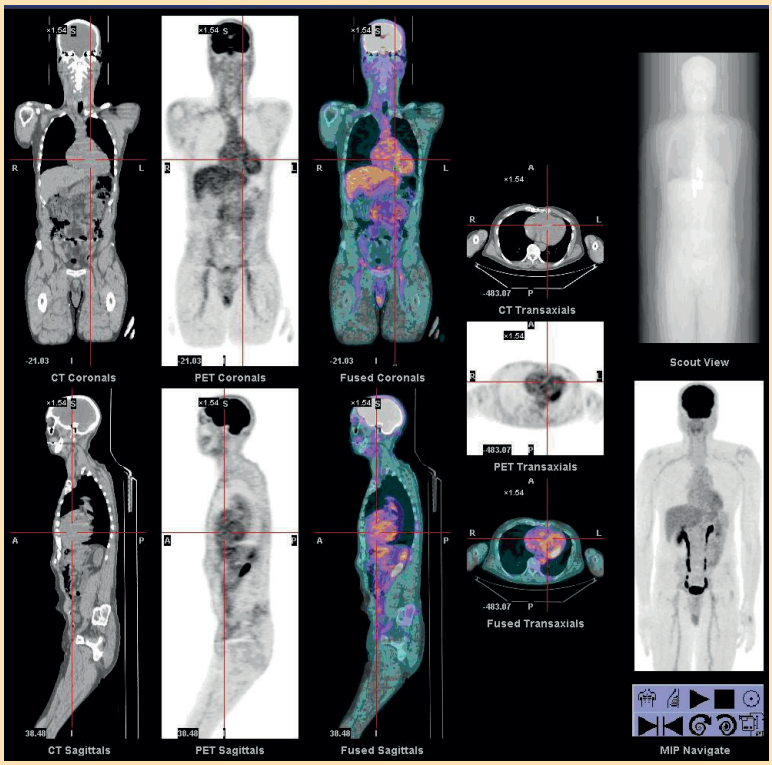


Figura S.7.15. Imágenes de CT y PET de cuerpo entero, reconstruidas en cortes sagitales, e imágenes PET-CT fusionadas.

Medicina Nuclear Terapéutica. Terapia metabólica

Se conocen como terapia metabólica aquellos tratamientos que emplean radionucleidos en forma no encapsulada (abierta), y en los que se aprovecha la afinidad o captación selectiva del radionucleido por algún órgano o tejido, para conseguir que este sea irradiado al nivel de dosis deseado, con una irradiación mucho menor en el resto de tejidos. Son administrados al paciente habitualmente mediante ingestión o inyección, o colocados de forma selectiva en los órganos o tejidos a tratar.

El ejemplo más habitual es el yodo-131 utilizado para los tratamientos de cáncer de tiroides e hipertiroidismo. Administrado por vía oral, dada la afinidad del yodo por la glándula tiroides, deposita de forma intensa la radiación en la misma y destruye el tejido tumoral (o reduce la actividad hormonal en el caso del hipertiroidismo).

En la terapia se emplean actividades más elevadas, y en ocasiones es preciso mantener ingresado al paciente durante algún tiempo tras la administración del radionucleido, en dependencias especialmente diseñadas (blindadas) y recoger y retener sus excretas, hasta que su contenido radiactivo decaiga lo suficiente para que puedan ser vertidas sin riesgo a la red de alcantarillado.

Otro tipo de terapia se aplica a tumores hepáticos no operables mediante microesferas de ytrio-90. Se trata de la administración directa al tumor de esferas de tamaño microscópico que contienen el isótopo radioactivo, que aportan elevadas dosis al tumor y una dosis muy pequeña a su entorno (dado que el ytrio-90 es un emisor beta puro, no emite radiación gamma). De esta forma se persigue eliminar el tumor respetando al máximo el tejido sano (hígado).

Medicina Nuclear Terapéutica. Terapia molecular y teragnosis

En cierto tipo de terapia oncológica, se aprovecha la afinidad de determinadas moléculas, llamadas radioligandos, para unirse selectivamente a ciertas moléculas diana que están presentes específicamente en las células tumorales en mayor medida que en el resto de las células. La molécula diana es en este ejemplo una proteína de membrana.

De esta manera, preparando un radiofármaco en el que se une a esta molécula-ligando un isótopo, que por sus propiedades se elige como el más adecuado para el tratamiento (generalmente emisores beta, en el caso de los tumores neuroendocrinos, por ejemplo, es el lutecio-177), al administrarlo al paciente se consigue que finalmente el isótopo deposite la radiación de forma muy selectiva en las moléculas diana del tumor, es decir, se alcanza un tratamiento muy dirigido, de manera que se evitan daños por efectos secundarios al reducir la irradiación de los tejidos sanos circundantes (figura S.7.16).

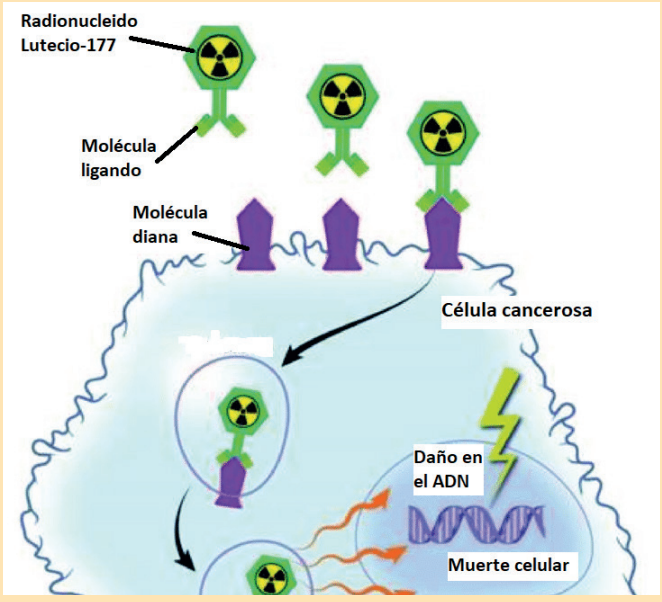


Figura S.7.16. Esquema del proceso implicado en la terapia molecular con radiofármacos.

Esta capacidad para poder irradiar tan específicamente aquellos tejidos tumorales donde está presente la molécula diana, preservando mejor el tejido sano, hace que estas técnicas se conozcan por el nombre de terapia molecular o dirigida, y el objetivo actual es encontrar moléculas diana en otros tipos de cáncer.

De la misma manera, puede aprovecharse la misma molécula radioligando, pero unida en este caso a un isótopo cuyas propiedades lo hagan más adecuado para el diagnóstico (por ejemplo, el galio-68), de forma que mediante un examen de PET obtengamos una imagen de captación, que pronostica de manera muy precisa cómo se comportará esa misma molécula-ligando cuando se administre unida al isótopo elegido para la terapia.

Esta correlación tan específica que se puede obtener entre el diagnóstico (que además identifica de forma mucho más precisa las zonas afectadas por el tumor) y la terapia, a través de una misma molécula, hace que conozcamos estos procedimientos con la palabra “teragnosis” que combina ambos conceptos de terapia y diagnóstico.

Medicina Nuclear en otras áreas. Ganglio centinela

En el procedimiento de diagnóstico y estadiaje del cáncer de mama, vulva, cérvix y melanoma, se ha estandarizado la utilización de la técnica de ganglio centinela, consistente en la administración local de una pequeña cantidad de material radiactivo (tecnecio-99m), y posterior uso de una sonda quirúrgica en el quirófano para la localización del ganglio centinela, primer ganglio que encuentran las células tumorales al diseminarse a través del sistema linfático del paciente. Tras su extirpación se examina en laboratorio, y su afectación indicaría posible extensión de la enfermedad al resto del organismo.

Radioterapia

La radioterapia consiste en la aplicación de altas dosis de radiación ionizante con el objeto de depositar, de manera generalmente localizada, la energía necesaria en un tejido para detener la progresión de las células tumorales.

Este objetivo terapéutico implica que el paciente reciba una dosis en una zona localizada que es decenas de miles de veces mayor que las dosis típicas de un procedimiento diagnóstico, ya sea en el ámbito del radiodiagnóstico o la medicina nuclear.

Partiendo de datos anatómicos precisos de cada paciente, adquiridos mediante TC, y eventualmente PET o resonancia magnética, mediante un *software*

especializado llamado planificador, el especialista en Radiofísica Hospitalaria diseña y optimiza el plan de tratamiento más adecuado, con la aprobación del especialista en Oncología Radioterápica, que habrá delimitado antes de manera precisa los volúmenes a tratar y órganos de riesgo, y habrá definido una prescripción y fraccionamiento de la dosis.

Un último paso, previo al inicio del tratamiento, es la comprobación exhaustiva del plan previamente diseñado, tras el que un cuidadoso procedimiento de control trata de asegurar que se llevará a cabo sobre el paciente el esquema de irradiación tal como ha sido definido.

Según sea la forma de impartir esta radiación se puede distinguir entre radioterapia externa (o teleterapia) y braquiterapia. Ambas se realizan en recintos con requerimientos de blindajes estructurales en su construcción muy superiores a los casos de radiodiagnóstico y medicina nuclear, para poder reducir las dosis en las zonas colindantes del exterior a esa sala a unos niveles suficientemente seguros para trabajadores y público. Además, están dotados de numerosas medidas de seguridad específicas para evitar irradiaciones no deseadas o accidentales.

Radioterapia externa o teleterapia

La radioterapia externa es la aplicación de haces de radiación de alta energía, generados por un dispositivo externo al paciente, y focalizados desde distintos ángulos sobre la zona de interés o volumen blanco.

Existen modalidades ligeramente distintas de radioterapia externa, según el equipo que genera y emite la radiación hacia el paciente.

Radioterapia externa conformada con haces de fotones y electrones

Es con diferencia la técnica más empleada, hace uso de un acelerador lineal de electrones que genera haces de fotones o electrones suficientemente uniformes y extensos dirigidos hacia el paciente (mostrado en la figura S.7.17).

La estructura por donde emerge la radiación, llamada brazo, acaba en un cabezal donde se configura la forma precisa del campo de radiación, mediante un colimador formado por láminas que se mueven independientemente; tanto brazo como colimador pueden girar alrededor del paciente, que permanece tumbado en una mesa de tratamiento. En algunos equipos esta mesa también puede rotar alrededor de un eje, lo que aumenta los posibles ángulos de incidencia de la radiación sobre el paciente.



Figura S.7.17. Acelerador lineal de electrones.

Tomoterapia

En esta modalidad, el cabezal del acelerador con el correspondiente colimador que conforma el campo gira alrededor del paciente describiendo una hélice a medida que se hace avanzar la mesa (a semejanza del proceso de obtención de un TC diagnóstico), de manera que se distribuye la radiación a la entrada del paciente desde muchas direcciones a la vez que se concentra en el lugar de interés.

Radioterapia intraoperatoria

Generalmente abreviada por sus siglas como RIO, consiste en la administración de una dosis alta de radiación mediante haces de electrones o haces de rayos X (estos últimos menos energéticos y penetrantes que en la teleterapia convencional), en una sesión única, en una zona anatómica delimitada y preparada durante un procedimiento quirúrgico.

Emplea aplicadores especialmente diseñados, en contacto con la zona anatómica a irradiar (ver figura S.7.18), permitiendo separar o proteger órganos y tejidos de tolerancia limitada. Las dosis en sesión única administradas con RIO tienen una equivalencia biológica superior a las mismas administradas con radioterapia externa y fraccionamiento convencional.



Figura S.7.18. Acelerador móvil de electrones con aplicador para tratamiento de radioterapia intraoperatoria.

Radiocirugía. *Gamma-knife* y *cyber-knife*

La radiocirugía designa aquellos tratamientos, generalmente realizados en una única sesión, que emplean campos muy pequeños conformados por colimadores especiales, y con sistemas de posicionamiento que permiten situar de manera muy precisa los volúmenes que deben irradiarse, con respecto a estructuras anatómicas del paciente que se mantengan estables.

Se desarrolló ampliamente sobre localizaciones craneales, donde se puede alcanzar esta elevada precisión y reproducibilidad en el posicionamiento, mediante guías o marcos estereotáxicos, que se fijan a la vez a los huesos del cráneo y a la unidad de tratamiento, como ilustra la figura S.7.19.

La unidad de tratamiento con la que se realiza la radiocirugía puede ser un acelerador lineal convencional adaptado en su configuración, en especial de sus colimadores, un acelerador con un brazo robotizado (lo que se conoce como *cyber-knife*), o incluso un conjunto de fuentes radiactivas distribuidas

alrededor de un punto central sobre el que se hacen confluir sus haces colimados a un diámetro pequeño. Este último equipo se conoce con el término inglés *gamma-knife*.



Figura S.7.19. Colocación del marco estereotáxico en cráneo.

Radioterapia estereotáctica corporal

Esta modalidad, conocida también por sus siglas en inglés (SBRT), traslada el concepto anterior y la alta precisión y estabilidad en el tratamiento a localizaciones extracraneales, buscando elevar las dosis administradas en cada sesión y reducir el número total de ellas frente a los tratamientos más convencionales, lo que se conoce como tratamientos hipofraccionados.

Radioterapia externa con haces de protones

Los haces de protones tienen la especial característica de depositar la energía de manera muy localizada en los tejidos. Por ser partículas cargadas con una masa significativa, depositan gran parte de su energía en el llamado “pico Bragg” a una determinada profundidad de tejido, solo una pequeña parte de energía en el recorrido antes de llegar a este punto, y apenas nada más allá de él, concentrando así la dosis en el lugar deseado, e irradiando menos el tejido circundante (figura S.7.20).

Esto es de especial interés en caso de tumores situados cerca de órganos o estructuras muy sensibles. Igualmente posibilita alcanzar dosis más altas y mejor control tumoral, y reducir posibles efectos adversos como el riesgo de desarrollar segundos tumores, lo cual es de especial importancia en pacientes pediátricos.

Estas instalaciones demandan un mayor cuidado a efectos de protección radiológica, tanto a la hora de exigir blindajes y construcciones de mayores dimensiones e importancia como a la hora de establecer procedimientos adecuados de trabajo, y de medir y controlar las dosis recibidas por los profesionales de la instalación.

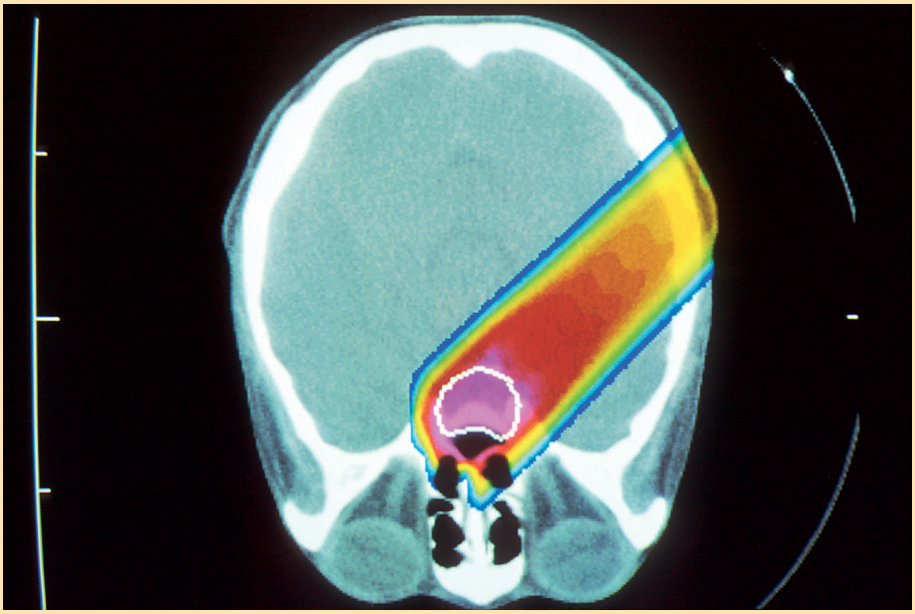


Figura S.7.20. Protonterapia: Las isodosis, que representan en colores los distintos niveles de radiación que alcanza cada zona, demuestran que puede conseguirse gran adaptabilidad a geometrías complejas.

Optimización en radioterapia externa

La optimización de los tratamientos de radioterapia descansa en todos y cada uno de los eslabones de la cadena de procedimientos que constituyen un tratamiento, desde la generación de los haces de radiación al posicionamiento del paciente, control del movimiento, verificaciones, etc.

Como ejemplo de la generación de haces de radiación optimizados, mejor conformados a las formas geométricas irregulares del volumen tumoral, para reducir la dosis impartida al resto de órganos o tejidos circundantes y disminuir así la toxicidad del tratamiento, se puede citar la radioterapia con modulación de intensidad (IMRT).

En ella se emplean un número grande de campos de radiación, a su vez compuestos de muchos segmentos o campos más pequeños superpuestos, definidos por las láminas de un colimador de reducido tamaño que sigue movimientos controlados previamente programados. Los campos pueden a su vez aplicarse al paciente en forma de arcos dinámicos, lo que se conoce como arcoterapia volumétrica (VMAT, por sus siglas en inglés).

En cuanto al control del posicionamiento, movimiento del paciente y sus órganos internos, control del movimiento respiratorio, etc., se han desarrollado las técnicas de guiado por la imagen. Estas tratan de monitorizar de forma dinámica y en tiempo real, a través de imágenes radiológicas o de termografía, la posición exacta de las estructuras de interés del paciente, sincronizando incluso estos movimientos con la emisión de radiación del acelerador.

Braquiterapia

La braquiterapia consiste en la colocación de fuentes radiactivas en contacto o en el interior del propio paciente, ayudándose de guías, catéteres o aplicadores específicos. Estas fuentes radiactivas son encapsuladas, es decir, se mantienen dentro de una estructura física que las contiene, de manera que no se dispersan o metabolizan en el interior del paciente.

El patrón de emisión de radiación de una pequeña fuente radiactiva en sus cercanías cumple un objetivo fundamental, que es obtener un alto gradiente de dosis. Esta es muy alta en su cercanía y disminuye abruptamente con la distancia, evitando por tanto la irradiación excesiva de los tejidos y órganos sanos que están alejados del tumor, donde se coloca la fuente.

La braquiterapia se subdivide en dos modalidades fundamentales: en la primera, o de implantes temporales, la fuente (habitualmente de iridio-192 o cobalto-60) se sitúa por un tiempo determinado dentro del paciente, generalmente alojada en unas guías o aplicadores colocados previamente en él. Transcurrido el tiempo calculado para alcanzar la distribución de dosis deseada, la fuente se retira. Esto puede hacerse en una sola aplicación o repetirse en varias sesiones.

La fuente permanece normalmente alojada en un equipo o proyector de fuentes, que la mantiene encerrada dentro de un blindaje, y solo se proyecta para alojarse durante el tiempo previamente determinado a través de unas guías o tubos de transferencia flexibles (figura S.7.21).



Figura S.7.21. Proyector de fuentes radiactivas con un tubo de transferencia conectado.

En la segunda modalidad o de implantes permanentes, la fuente o fuentes se colocan en el paciente no siendo necesario retirarlas posteriormente, pues no produce irradiación perjudicial para el paciente ni para las personas de su entorno. Un ejemplo son los tratamientos con pequeñas fuentes o semillas de iodo-125 para el tratamiento del cáncer en la próstata.

La braquiterapia se llama intracavitaria, si la fuente se aloja en una cavidad del paciente, como es el caso de los tratamientos en tumores ginecológicos, o intersticial, si se inserta dentro del tejido del propio tumor.

Según la tasa de dosis que emite la fuente, se suele distinguir entre braquiterapia de baja tasa de dosis, cuando se mantiene la fuente en el paciente unas cuantas horas, o braquiterapia de alta tasa, cuando la fuente permanece en el paciente escasos minutos. Generalmente se distribuye este tiempo de permanencia en diferentes posiciones para conseguir una distribución de la dosis geométricamente adecuada, esta última modalidad permite tratamientos ambulatorios, y es la más extendida en el presente.

8. RESIDUOS RADIACTIVOS: ORIGEN Y GESTIÓN

Los residuos radiactivos y su clasificación

Las aplicaciones de los isótopos radiactivos, como el resto de las actividades humanas, también generan residuos. La característica principal de estos es la emisión de radiaciones ionizantes. De acuerdo con la legislación española, residuo radiactivo es cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear.

Los residuos radiactivos se clasifican en diferentes categorías teniendo en cuenta sus niveles de radiactividad y el periodo radiactivo de los radionucleidos que mayoritariamente contengan.

Se denominan residuos de vida larga aquellos que contienen cantidades importantes de radionucleidos cuyo periodo de semidesintegración sobrepasa 30 años y de vida corta en caso contrario. La clasificación en España particulariza las categorías siguientes:

- Residuos de muy baja actividad de vida corta. Contienen una cantidad muy baja de radionucleidos, en concentraciones del orden de 10 a 100 Bq/g. Se estima que en España será necesario gestionar 125 000 m^3 de este tipo de residuos cuyo origen es fundamentalmente el desmantelamiento de las centrales nucleares.

- Residuos de muy baja actividad de vida larga. Contienen cantidades muy bajas de radionucleidos y se han generado como consecuencia de las actividades de concentración de los minerales de uranio necesarios para la fabricación del combustible nuclear. En España la gestión de este tipo de residuos radiactivos se lleva a cabo mediante el apilamiento y la estabilización *in situ* en las propias instalaciones productoras.

- Residuos de baja y media actividad de vida corta. Su contenido de radiactividad se sitúa en general en concentraciones entre 1000 y 1 000 000 de Bq/g, con menos de 10 000 Bq/g de radionucleidos de vida larga. Su radiactividad dentro de 300 años, será comparable con la radiactividad natural. Se ha estimado que en España será necesario gestionar unos 94 000 m^3 de residuos de baja y media actividad. Su origen es debido fundamentalmente a la operación de las centrales nucleares y otras instalaciones nucleares. También se generan pequeñas cantidades en las instalaciones médicas e industriales que utilizan materiales radiactivos.

- Residuos radiactivos de alta actividad. Contienen cantidades de radiactividad muy elevadas y son generadores de calor. En España estos residuos son fundamentalmente los elementos combustibles una vez utilizados en las centrales nucleares.

Las cantidades totales de residuos radiactivos que será necesario gestionar, según inventario a 31-12-2022 y previsión de generación desde esa fecha se muestran en la siguiente tabla S.8.1:

Tabla S.8.1. Cantidades estimadas de residuos radiactivos según el 7º Plan de General de Residuos Radiactivos

Tipo de residuo	Volumen aproximado (m^3)			Porcentaje (%)
	Inventario a 31-12-2022	Previsión generación	Inventario total	
Muy baja actividad (RBBA)	31 300	93 700	125 000	53
Baja y media actividad (RBMA)	41 100	53 100	94 200	40
Residuos especiales	200	3700	3900	2
Combustible gastado y residuos de alta actividad	8900	2500	11 400	5
Total	**81 500**	**153 000**	**234 500**	**100**

Origen de los residuos radiactivos

En España se generan residuos radiactivos en una serie de instalaciones distribuidas por todo el territorio nacional, que utilizan materiales y sustancias radiactivas según lo regulado por la normativa específica aplicable y que son las denominadas instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas.

De acuerdo con el 7º Plan General de Residuos Radiactivos, las actividades en las que se generan actualmente, así como las que potencialmente podrían generar residuos en el futuro, son fundamentalmente las siguientes:

- La operación de las centrales nucleares para la producción de electricidad y su posterior desmantelamiento.

- La operación y el futuro desmantelamiento de la fábrica de elementos combustibles.

- Las aplicaciones de los radioisótopos en medicina, industria, agricultura e investigación.
- Posibles actuaciones de descontaminación o intervención.
- Ocasionalmente pueden generarse residuos radiactivos en otros ámbitos, como consecuencia de actividades específicas fuera de instalaciones nucleares y radiactivas.

Las distribuciones porcentuales en función del origen de los residuos, según el inventario existente a 31-12-2022 y la previsión de generación a partir de esta fecha se pueden observar en la tabla S.8.2.

Tabla S.8.2. Distribuciones porcentuales en función del origen

Residuos de baja y media actividad (RBMA) y residuos de muy baja actividad (RBBA)	Inventario a 31-12-2022	Previsión de generación desde 1-1-2023
Desmantelamiento de centrales nucleares	22 %	82,9 %
Operación de las centrales nucleares	55 %	8,5 %
Aplicaciones médicas o industriales	22 %	8,2 %
Fabricación de elementos combustibles	1 %	0,3 %
Otros	4 %	0,2 %

Combustible gastado de las centrales nucleares y residuos de alta actividad (RAA)	Inventario a 31-12-2022	Previsión de generación desde 1-1-2023
Combustible gastado de las centrales Nucleares + Residuos de alta actividad	97,7 % + 0,1 %	40,3 %
Otros residuos	2,2 %	59,7 %

En la tabla S.8.3 se muestran las opciones de gestión a largo plazo de los residuos radiactivos, que se han implantado hasta la fecha en España y las que se encuentran previstas según el 7º Plan General de Residuos Radiactivos aprobado en diciembre de 2023.

Tabla S.8.3. Gestión prevista de los residuos según el 7º Plan General de Residuos Radiactivos

Actividad inicial	Vida media	
	Corta < 30 años	Larga > 30 años
Muy baja actividad	Almacenamiento El Cabril	Estabilización *in situ* en emplazamientos mineros e industriales
Baja y media actividad	Almacenamiento El Cabril	Almacén Temporal Descentralizado (ATD) en cada central nuclear, formado por Almacenes Temporales Individuales. Almacenamiento definitivo en formaciones geológicas profundas (AGP)
Alta actividad		

La gestión de los residuos radiactivos

El objetivo de la gestión a largo plazo de los residuos radiactivos es proteger a las personas y al medio ambiente contra toda emisión de radiaciones ionizantes o diseminación de las materias radiactivas que contienen. En un sentido más amplio, la gestión de los residuos radiactivos comprende también todas las actividades técnicas y administrativas desde que se generan los residuos hasta que se almacenan de forma definitiva (gestión a largo plazo), incluyendo todas las operaciones intermedias de manejo, tratamiento, acondicionamiento, transporte y almacenamiento temporal.

Esta necesidad constituye una cuestión de interés nacional y las decisiones que se adopten deben garantizar al máximo la seguridad, además de la transparencia y la participación pública. Se trata de una cuestión en la que están implicadas consideraciones éticas y de justicia intergeneracional, pues los beneficios obtenidos en la actualidad no deben entrañar riesgos para las generaciones futuras.

En esencia, la gestión a largo plazo de los residuos radiactivos de una manera segura se consigue aislándolos del entorno humano de manera controlada durante el tiempo necesario para que su radiactividad desaparezca. El tiempo necesario depende del tipo de residuo. Los residuos de muy baja actividad de vida corta necesitan ser controlados durante algunas decenas de años. Los residuos radiactivos de baja y media actividad y vida corta necesitan algunos siglos y los residuos de alta actividad miles de años.

La estrategia de gestión a largo plazo de los residuos radiactivos que es mayoritariamente utilizada, es su concentración, confinamiento y aislamiento de la biosfera, mediante barreras que aseguran que los contaminantes radiactivos no se dispersarán y serán transportados hasta el entorno humano. Un factor importante en la estrategia de gestión es la profundidad, medida desde la superficie de la tierra, en la que se construirán las instalaciones de almacenamiento, siendo dos las opciones de gestión consideradas:

- Almacenamiento en la superficie de la tierra o muy cerca de ella. Esta opción es adecuada para los residuos radiactivos que tengan muy bajo contenido de radionucleidos de vida larga. Se representa en la figura S.8.1.

  La situación de estas instalaciones hace que puedan ser fácilmente accesibles a la intrusión humana o animal y a su deterioro por los agentes medioambientales habituales, por lo que requieren un control efectivo durante algunos cientos de años (hasta un máximo de 300 años).

  Durante este periodo de tiempo se producirá el decaimiento de la radiactividad almacenada hasta valores que garantizarán que los riesgos para las personas son aceptables.



Figura S.8.1. Esquema de una instalación de almacenamiento en superficie.

- Almacenamiento en formaciones geológicas profundas. Esta opción es la adecuada cuando la actividad de los residuos radiactivos es muy elevada y contienen grandes cantidades de radionucleidos de vida larga (>30 años).

La situación de los residuos a gran profundidad (varios cientos de metros) hace que no sean accesibles a la intrusión humana y su ubicación en formaciones geológicas seleccionadas por su gran estabilidad garantiza un elevado grado de aislamiento.

Principios de seguridad en la gestión de los residuos radiactivos

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha enunciado los principios de seguridad que deben orientar la gestión de los residuos radiactivos. Son los siguientes:

- **Principio 1:** protección de la salud humana.
- **Principio 2**: protección del medio ambiente.
- **Principio 3:** protección más allá de las fronteras nacionales.
- **Principio 4:** protección de las generaciones futuras.
- **Principio 5:** necesidad de no imponer cargas indebidas a las generaciones futuras.
- **Principio 6:** necesidad de un marco legal nacional y de independencia de los órganos reguladores.
- **Principio 7:** control de la generación de residuos radiactivos. Minimización de su producción.
- **Principio 8:** necesidad de tener en cuenta las interdependencias entre todas las etapas de gestión de los residuos radiactivos.
- **Principio 9:** necesidad de garantizar la seguridad de las instalaciones de gestión durante toda su vida.

España ha ratificado la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y de los Residuos Radiactivos, comprometiéndose internacionalmente a requerir los más altos niveles de seguridad en la gestión de estos materiales, de acuerdo con las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Cada periodo de tres años, España se somete a un examen de carácter internacional para que los demás países firmantes de la Convención Conjunta valoren la seguridad de nuestra gestión de los residuos radiactivos. El primero de dichos exámenes se realizó en 2003.

¿Qué hay entre los residuos radiactivos y el medio ambiente?

Para evitar que los radionucleidos contenidos en los residuos radiactivos puedan llegar hasta la biosfera, se diseñan para su gestión a largo plazo los almacenamientos definitivos, utilizando un sistema de barreras de seguridad múltiples que los separan del medio ambiente.

El elemento principal a evitar es que el agua de lluvia o el agua subterránea entren eventualmente en contacto con los residuos radiactivos, disuelvan los radionucleidos presentes y los transporten al entorno humano.

Para evitar esta circunstancia, la estrategia que se adopta es crear una serie de barreras que se interponen entre los residuos y el medio humano y que pueden ser naturales o artificiales. Normalmente se suele hablar de tres barreras de seguridad, representadas en la figura S.8.2.

- **1ª barrera:** la más cercana al residuo radiactivo. Es una barrera artificial que rodea al residuo o que lo inmoviliza mezclándose con él para formar un producto sólido difícilmente dispersable.

- **2ª barrera:** se sitúa entre la primera barrera y el medio geológico en el que se encuentra el almacenamiento. Está constituida por construcciones en las que se depositan los residuos especialmente preparados para impedir que el agua pueda tener acceso a su interior.

- **3ª barrera:** está constituida por el medio y lugar geológico en el que se construye la instalación y debe ser previamente seleccionado de acuerdo con estrictos criterios que garanticen sus propiedades idóneas para la retención de los posibles radionucleidos que pudieran atravesar las dos primeras barreras.



Figura S.8.2. Funcionamiento y disposición de las barreras de seguridad.

Los residuos radiactivos sólidos o líquidos, una vez producidos, son objeto de lo que se denomina caracterización: determinación de su composición química, radiológica y de sus propiedades físico-químicas. Posteriormente se procede a su acondicionamiento, proceso que incluye el conjunto de operaciones destinadas a que los residuos se conviertan en productos que puedan ser transportados y almacenados definitivamente.

Las operaciones de acondicionamiento transformarán los residuos en productos física y químicamente estables y asegurarán el confinamiento eficaz y perdurable de los radionucleidos que contienen.

Para conseguir este objetivo se pueden llevar a cabo dos tipos de procesos: inmovilización o bloqueo de los residuos.

La inmovilización consiste en incorporar el residuo homogéneamente a otro material (cemento, bitumen, vidrios) para formar una matriz cuya naturaleza y características dependen del tipo de residuo (cemento y bitumen para lodos, líquidos concentrados, cenizas de incineración, matrices vítreas para ligar los radionucleidos a la red vítrea en el caso de productos de fisión y actínidos). La matriz contribuye a la función de confinamiento de los radionucleidos y posteriormente se incorpora a un contenedor adecuado constituyendo lo que se denomina bulto de residuos radiactivos.

El bloqueo consiste en introducir los residuos dentro de una envolvente sólida, generalmente de cemento, con un espesor determinado, que es la que garantiza el confinamiento de los radionucleidos. Este conjunto se introduce en un contenedor adecuado constituyendo el bulto de residuos.

Gestión de los residuos de baja y media actividad en España

Para los residuos de muy baja actividad, y baja y media actividad, se dispone de un sistema integral de gestión consolidado, del que forma parte esencial la instalación centralizada de almacenamiento definitivo en superficie El Cabril, en el municipio de Hornachuelos (Córdoba).

Los residuos de baja y media actividad procedentes de las centrales nucleares llegan a El Cabril acondicionados en bidones metálicos de 220 litros. Estos bidones son introducidos en contenedores de hormigón armado de forma cúbica de dos metros de lado, inmovilizándolos interiormente con cemento, como se puede ver en la figura S.8.3. Los contenedores se conducen posteriormente a su destino definitivo, que consiste en celdas de hormigón armado con capacidad para 320 contenedores.

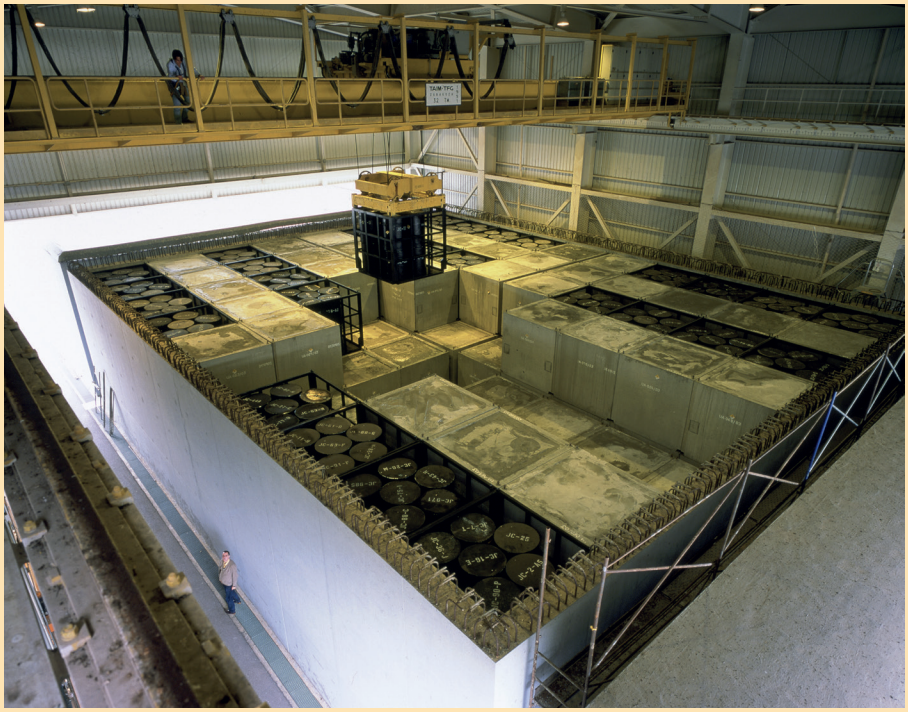


Figura S.8.3. Aspecto de los bidones de residuos acondicionados para su almacenamiento en celdas de hormigón armado.

Gestión inicial de los pequeños productores de residuos de muy baja, baja y media actividad

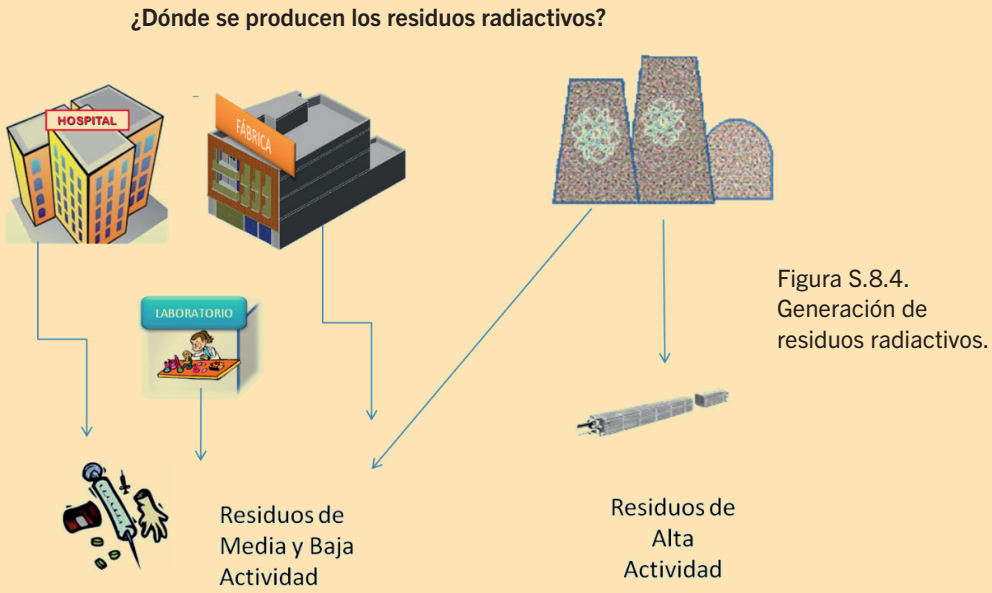


Figura S.8.4. Generación de residuos radiactivos.

Una buena parte de los residuos generados inicialmente como consecuencia de las actividades en sectores como las aplicaciones en medicina e investigación, presentan niveles de actividad muy bajos, por lo que muy probablemente podrán ser evacuados como residuos convencionales si tras la segregación y caracterización adecuada, los niveles de concentración de actividad lo permiten, por ser inferiores a los valores de desclasificación establecidos para cada radionucleido en la normativa.

Aun no cumpliéndose lo anterior de partida en el residuo cuando se genera, si el periodo de semidesintegración del radionucleido no es muy elevado, pueden almacenarse el tiempo necesario en la propia instalación radiactiva (o en una instalación autorizada al efecto dentro del centro sanitario o de investigación), hasta que la actividad se haya reducido a los valores de desclasificación regulados, por debajo de los cuales el material no ha de ser considerado radiactivo, y se evacúa como un residuo convencional.

Este tipo de residuos está constituido por objetos tales como toallas de papel, algodones y gasas, jeringas usadas y viales, pipetas, material de laboratorio, guantes de goma y cubiertas para calzado, filtros de aire, etc.

De esta manera se evita la gestión costosa de un alto volumen de residuos que ocuparía gran espacio en instalaciones de almacenamiento como la de El Cabril, y solo son destinados a esta los residuos en los que no es posible un almacenamiento hasta valores de desclasificación.

Los residuos procedentes de instalaciones radiactivas (pequeños productores) llegan a El Cabril sin acondicionar, operación que se realiza en las instalaciones allí existentes, procediéndose a partir de esta operación de acuerdo con el proceso mencionado en el párrafo anterior para los residuos que tenían su origen en las centrales nucleares.

Una vez llena cada celda, se cubre con una losa de hormigón armado. Cuando todas las celdas estén completadas se cubrirán con sucesivas capas de arcilla y grava, y se integrarán paisajísticamente en la zona. Un aspecto general de la instalación se muestra en la figura S.8.5. La instalación de El Cabril se ha ampliado posteriormente con la construcción de celdas de almacenamiento específicas para los residuos de muy baja actividad.



Figura S.8.5. Imagen de la instalación de El Cabril, donde se aprecian celdas ya llenas y otras en proceso de llenado.

Gestión del combustible gastado generado en las centrales nucleares

El combustible que se utiliza en las centrales nucleares para la producción de energía eléctrica, cuando ha finalizado su vida útil, se descarga del reactor y se almacena en piscinas en la propia central nuclear. Con carácter general, se contemplan dos opciones para la gestión del combustible: el ciclo abierto o el ciclo cerrado.

El ciclo abierto considera el combustible gastado como un residuo de alta actividad que debe ser gestionado. Para ello, hasta disponer de instalaciones de almacenamiento definitivo, necesita ser dispuesto en instalaciones temporales en la propia central nuclear (piscinas o Almacenes Temporales Individuales, ATI) o bien en un Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC). Finalmente, la opción de gestión que se plantea es su almacenamiento definitivo en formaciones geológicas profundas (AGP).

El ciclo cerrado actualmente implantado en algunos países como Francia y Japón, considera que el combustible gastado no es un residuo sino un material valorizable y se realiza su tratamiento (reproceso) con el fin de recuperar el uranio y el plutonio presentes en ellos para ser utilizados como nuevos combustibles.

Existe también la posibilidad del denominado ciclo cerrado avanzado en el que se separarán algunos radionucleidos con largo periodo de semidesintegración y alta radiotoxicidad, como el plutonio (ya recuperado en el reproceso actual) y los

denominados actínidos minoritarios (neptunio, americio y curio). A este proceso de separación le seguiría la transmutación, cuyo objetivo es transformar ciertos radionucleidos de vida larga en otros de vida más corta o isótopos estables disminuyendo de esta forma el riesgo radiológico de su almacenamiento definitivo. Existen actualmente proyectos en fase de investigación en EE. UU., Francia, Suiza y Japón.

Estas tres opciones, representadas en la figura S.8.6, tienen en común dos etapas fundamentales: el almacenamiento temporal de los combustibles gastados y el posterior almacenamiento final o definitivo, bien sea de los propios combustibles gastados (ciclo abierto) o de los residuos procedentes del reproceso (ciclo cerrado actual o avanzado).

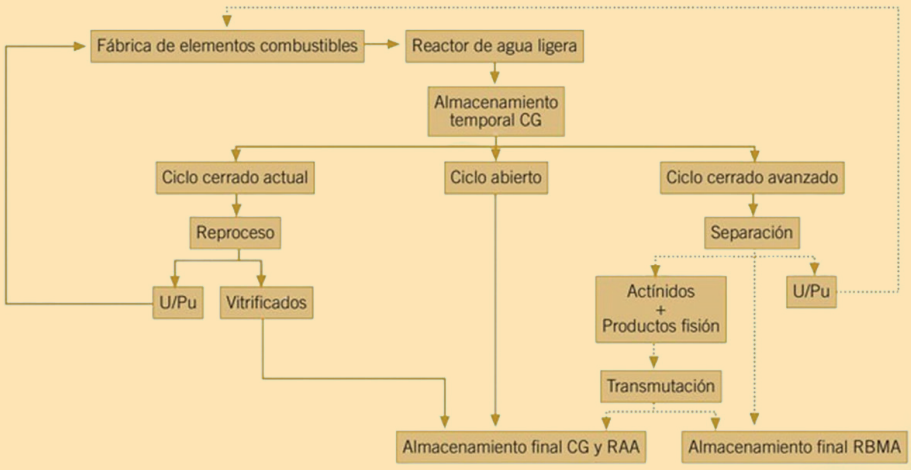


Figura S.8.6. Opciones generales posibles de gestión del combustible gastado.

En España la opción de gestión del combustible gastado adoptada es la de ciclo abierto, no contemplándose la opción del reprocesado, por lo que una vez descargado el combustible en las propias piscinas de la central y puesto que la capacidad de estas es limitada, es necesario que al cabo de un cierto tiempo el combustible sea trasladado a unos almacenes intermedios a la espera de su almacenamiento final.

Según lo establecido en el 7º Plan General de Residuos Radiactivos, en España se cuenta con capacidad para el almacenamiento temporal del combustible gastado en las piscinas de almacenamiento de las centrales nucleares y en almacenes temporales individuales en seco (ATI) en las mismas, en los que se dispone un número variable de contenedores con elementos combustibles gastados en su interior.

Este 7º Plan establece la puesta en marcha de un Almacén Temporal Descentralizado (ATD) para combustible gastado, residuos de alta actividad y residuos especiales en cada central nuclear, formado por sus ATI, más una nueva instalación complementaria o medidas adicionales, que permitan realizar las operaciones de mantenimiento y reparación de sus contenedores. Estos ATD estarán

operativos antes de iniciar el desmantelamiento de la piscina de combustible de la central y contarán con todos los sistemas de seguridad y auxiliares para poder operar como instalación nuclear independiente, una vez se haya declarado la clausura de la central.

El 7º Plan contempla que desde 2031 se dispondrá en el emplazamiento de una de las centrales nucleares de los medios que permitan atender las potenciales contingencias en los ATD durante toda su vida operativa, hasta el traslado definitivo de los residuos de alta actividad y combustible gastado que contengan, a un almacenamiento definitivo en formaciones geológicas profundas (AGP), cuya puesta en marcha se prevé en 2073.

El escenario de referencia que contempla el 7º Plan General de Residuos Radiactivos es el cese de la explotación de las centrales nucleares, escalonadamente entre 2027 y 2035, en coherencia con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC).

Generación de residuos radiactivos en el desmantelamiento de las centrales nucleares y otras instalaciones

El desmantelamiento es el desmontaje y demolición de las estructuras, tuberías y componentes, de hormigón o metálicos, que pueden estar activados o contaminados internamente para su posterior tratamiento como residuos radiactivos. El 85 % del total de una central nuclear nunca llega a ser radiactivo ni se contamina y son residuos y escombros convencionales.

Cuando tiene lugar la parada definitiva de una central nuclear se procede, en el plazo más breve posible, a la retirada de todo el combustible gastado que hay en ella, tanto en el núcleo del reactor como almacenado en sus piscinas.

En el caso de los reactores de agua ligera, se procede a continuación a tratar el agua de refrigeración y otros líquidos contaminados, concentrándolos y solidificándolos con cemento, obteniendo residuos sólidos de baja o de media actividad que se retiran de la central. También se retiran todos los residuos sólidos de baja y media actividad que hubiera almacenados en la central en espera de su envío al almacenamiento definitivo. A continuación, tendrán lugar dos procesos diferentes, pero relacionados entre sí, que son la descontaminación y el desmantelamiento.

La descontaminación engloba todas las operaciones de limpieza para separar los pequeños depósitos de residuos radiactivos que pueden estar fijos en las superficies de la vasija, de los tubos, en bombas, circuitos, equipos, suelos, etc.

En España está en fase de desmantelamiento la central Vandellós I. El proceso se inició en 1997 y una primera fase concluyó en 2005, con lo que solo resta el

desmantelamiento del edificio del reactor sometido a un periodo de espera y decaimiento denominado fase de latencia, que tiene una duración prevista de unos 25 años.

También se encuentran en desmantelamiento, desde 2010 la central nuclear José Cabrera en Zorita (Guadalajara) y desde 2023 la Central Nuclear de Santa María de Garoña (Burgos).

Además, también están en curso los trabajos de desmantelamiento de diversas instalaciones de investigación en el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) de Madrid.

Responsabilidad en la gestión de los residuos radiactivos en España

En España la política y estrategia de la gestión de los residuos radiactivos se encuentra definida en los planes generales de residuos radiactivos, aprobados periódicamente por el Gobierno. El 7º Plan vigente, fue aprobado el 27 de diciembre de 2023.

La política y estrategia de gestión corresponde al Gobierno y su aplicación se lleva a cabo de manera exclusiva a través de la empresa pública Enresa.

Enresa (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A., S.M.E.), está encargada de la gestión del combustible gastado y los residuos radiactivos, así como del desmantelamiento de las instalaciones nucleares, y está dotada de los recursos humanos, técnicos y financieros para llevar a cabo esta labor. La responsabilidad de la gestión hasta que los residuos son entregados a Enresa corresponde a los productores.

El control de la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos corresponde en España al Consejo de Seguridad Nuclear.

El Consejo de Seguridad Nuclear es el organismo regulador competente en España en materia de seguridad nuclear y de protección radiológica. Entre sus misiones tiene encargada la de garantizar a la sociedad que la gestión de los residuos radiactivos se lleva a cabo de manera segura y que el riesgo radiológico asociado está por debajo de los límites aceptables. Para ello realiza el control y la vigilancia de los residuos en las instalaciones en las que se generan y en las actividades que Enresa realiza para su gestión.

Los costes de la gestión de los residuos radiactivos, en el caso de las centrales nucleares, se cubren con la generación de unos fondos por anticipado a lo largo de su vida operativa, que se recaudan mediante el pago de unas prestaciones sobre la producción bruta de energía eléctrica. Para los demás productores de residuos radiactivos, la financiación de estos costes se basa en una contraprestación económica por los servicios prestados por Enresa.

9. EL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

En España, el único organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica es el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) (figura S.9.1). Es un ente de Derecho Público, independiente de la Administración General del Estado, con personalidad jurídica y patrimonio propio, que se rige por su Estatuto y rinde cuentas al Congreso y al Senado.



Figura S.9.1.
Sede del Consejo de Seguridad Nuclear (Madrid).

La misión del CSN es proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, consiguiendo que las instalaciones nucleares y radiactivas sean operadas por los titulares de forma segura, y estableciendo las medidas de prevención y corrección frente a emergencias radiológicas, cualquiera que sea su origen.

El Consejo es un órgano colegiado, integrado por cinco miembros (presidente y cuatro consejeros) propuestos por el Gobierno y refrendados por el Congreso de los Diputados. El total de efectivos que presta servicios en el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ronda los 450 empleados. Cerca del 70 % de la plantilla son titulados superiores especializados en seguridad nuclear y protección radiológica. Aproximadamente la mitad de la misma son mujeres. La edad media del personal del organismo se sitúa en torno a los 52 años.

El personal que presta servicios en el CSN está compuesto por funcionarios de carrera y personal laboral, según el art. 49 del Estatuto del CSN, aprobado por

el Real Decreto 1440/2010, de 5 de noviembre. El personal técnico del CSN estará formado por los funcionarios del Cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, según establece el art. 55 del referido Estatuto.

El CSN está capacitado para suspender la construcción o el funcionamiento de las instalaciones nucleares o radiactivas por razones de seguridad. Concede licencias para las personas responsables de la operación de las instalaciones, estudia la influencia de las mismas en el medio ambiente y establece los límites y condiciones para su funcionamiento de forma que este no suponga un impacto radiológico inaceptable para las personas o el medio ambiente.

Mantiene informada a la opinión pública sobre temas de su competencia. Asimismo, informa anualmente de sus actuaciones al Congreso de los Diputados, al Senado y a los parlamentos de las comunidades autónomas en cuyo territorio están ubicadas las instalaciones nucleares, elaborando un informe que recibe una amplia difusión pública.

Las funciones del Consejo de Seguridad Nuclear vienen recogidas en el artículo 2 de la Ley 15/1980, de 22 de abril, de Creación del Consejo de Seguridad Nuclear, reformada por la Ley 33/2007 de 7 de noviembre y en el artículo 4 del Estatuto del Consejo de Seguridad Nuclear aprobado por el Real Decreto 1440/2010, de 5 de noviembre. Entre ellas, podemos destacar las siguientes:

- **Propone al Gobierno** las reglamentaciones necesarias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, así como las revisiones que considere convenientes.

- **Emite informes preceptivos** al departamento ministerial correspondiente relativos a la seguridad nuclear, protección radiológica y protección física, previos a las resoluciones que este adopte, entre otras, en materia de concesión de autorizaciones para las instalaciones nucleares y radiactivas, y transportes de sustancias nucleares o materiales radiactivos.

- **Realiza toda clase de inspecciones en las instalaciones nucleares o radiactivas**, al objeto de asegurar el cumplimiento de todas las normas y condicionamientos establecidos, teniendo autoridad para suspender el funcionamiento de las instalaciones o las actividades que se realicen, por razones de seguridad.

- **Propone la apertura de los expedientes sancionadores** que considere pertinentes en el ámbito de sus competencias. Iniciado un procedimiento sancionador, el CSN emitirá un informe preceptivo para la adecuada calificación de los hechos objeto del procedimiento.

- **Colabora con las autoridades competentes en la elaboración de los criterios a los que han de ajustarse los planes de emergencia exterior y los planes de**

protección física de las instalaciones nucleares y radiactivas. Una vez redactados los planes, participa en su aprobación.

- **Controla las medidas de protección radiológica de los trabajadores profesionalmente expuestos, del público y del medio ambiente**. Además, vigila y controla las dosis de radiación recibidas por los trabajadores. Evalúa el impacto radiológico ambiental de las instalaciones nucleares y radiactivas, y controla y vigila la calidad radiológica del medio ambiente.

- **Concede y, en su caso, revoca** las autorizaciones correspondientes a las entidades o empresas que presten servicios en el ámbito de la protección radiológica.

- **Concede y renueva**, mediante la realización de las pruebas que el propio Consejo establece, **las licencias de operador y supervisor** para instalaciones nucleares y radiactivas.

- **Asesora a los tribunales y a los órganos de las Administraciones públicas** en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

- **Mantiene relaciones oficiales** con organismos similares extranjeros y participa en organismos internacionales con competencia en temas de seguridad nuclear o protección radiológica.

- **Informa a la opinión pública** sobre materias de su competencia.

- **Establece y efectúa el seguimiento de planes de investigación** en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

- **Inspecciona, evalúa, controla, propone y adopta**, en caso de ser necesario, informando a la autoridad competente, **cuantas medidas de prevención y corrección sean precisas ante situaciones excepcionales o de emergencia** que se presenten.

Organización de respuesta ante emergencias

La declaración de una emergencia ya sea nuclear o radiológica, por parte de la autoridad competente, o de la dirección de la emergencia de la instalación, lleva consigo la activación de la Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE) del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

La Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE) del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es la estructura operativa que cuenta con los equipos humanos, medios técnicos y procedimientos operativos adecuados para el cumplimiento eficaz y eficiente de sus funciones en emergencias nucleares y

radiológicas. Esta estructura es complementaria a su organización ordinaria de trabajo y en ella participan sus unidades técnicas y logísticas.

La ORE tiene como funciones exclusivas:

- Elaborar un análisis técnico de la situación a partir de la información recibida o mediante equipos de intervención en la zona y mantener un seguimiento continuo de la evolución del accidente.
- Contribuir a llevar la situación de emergencia a condición segura.
- Mitigar las consecuencias radiológicas generadas por el accidente que ocasionó la situación de emergencia sobre las personas, bienes, y el medio ambiente.
- Informar y asesorar a las autoridades encargadas de dirigir el plan de emergencia aplicable, sobre la adopción de medidas de protección de la población.
- Informar a la población sobre los riesgos asociados a la situación de emergencia.
- Dar cumplimiento a los compromisos internacionales en materia de pronta notificación y asistencia mutua en lo que al CSN afecte.

Con el fin de cumplir eficazmente sus funciones, el CSN dispone de un Plan de Actuación ante Emergencias (PAE) que incluye una organización específica de sus recursos humanos, agrupados en áreas de especialidad técnica, y la disposición de unos medios especiales instalados en una Sala de Emergencias (Salem) que constituye el centro de control y coordinación de las actuaciones del organismo en situaciones de emergencia (figura. S.9.2).

La ORE del Consejo de Seguridad Nuclear dispone de retenes cuya misión es constituir la organización de emergencias en modo reducido proporcionando una respuesta adecuada en los primeros momentos de la situación de emergencia. La organización de emergencias del CSN se mantiene en modo de alerta permanente, con la Salem activa las 24 horas del día y los 365 días del año. En este modo de actuación la función principal de la ORE es mantener la operatividad de la Salem en todo momento y activar los efectivos necesarios en caso de emergencia.

Además, la ORE cuenta con los siguientes apoyos externos en el caso de que fuera necesaria su participación en una emergencia:

- Unidad de Apoyo a la Intervención Radiológica (UIR): tiene como misión la caracterización radiológica y la colaboración en la implementación de las medidas de protección. Está compuesta por técnicos especialistas del CSN, de las comunidades autónomas con acuerdo de encomienda con el CSN y de la Unidad Técnica de Protección Radiológica de apoyo a la intervención contratada al efecto por el CSN.

- Unidades móviles de caracterización radiológica que, mediante acuerdos de colaboración previos, están a disposición del CSN desde diferentes organismos e instituciones para participar en las emergencias donde sean requeridas.

- Unidades móviles de dosimetría interna, para el control dosimétrico de actuantes y del público, que, también en virtud de acuerdos de colaboración suscritos con antelación, están a disposición del CSN para su activación.

- Empresa Nacional de Residuos, S.A. (Enresa), que colaboraría en tareas de descontaminación en general, control de residuos y recuperación de zonas afectadas.

- Medios y capacidades del GIETMA de la UME, en este caso solo para las actividades de caracterización radiológica e implementación de medias de protección radiológica, en virtud del convenio de colaboración suscrito al efecto.

- Diversos laboratorios para el análisis de muestras.

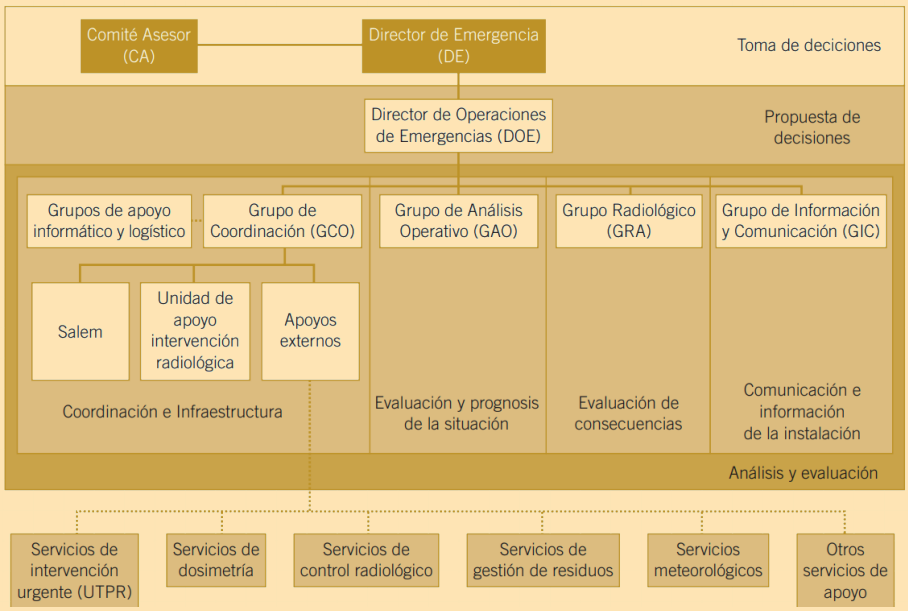


Figura. S.9.2. Organización de respuesta del CSN en emergencias.

La Sala de Emergencias (Salem)

La Sala de Emergencias del CSN atendida por técnicos especializados funciona las 24 horas del día todos los días del año (figura S.9.3). Está dotada de un sofisticado sistema de comunicaciones que permite conocer lo que ocurre en las instalaciones nucleares y sus alrededores desde el punto de vista operativo y radiológico, y de sistemas de transmisión de información con conexiones fiables y seguras con los centros de emergencia de las instalaciones, con la Dirección General de Protección Civil y Emergencias, con las delegaciones y subdelegaciones de Gobierno y con Presidencia de Gobierno.



Figura S.9.3. Salem (CSN).

Para el desarrollo de sus actividades en situación de emergencia, la Salem está dotada de equipamiento suficiente para conocer la situación producida y su previsible evolución, así como los datos meteorológicos de la zona afectada. Dispone de medios de cálculo para las estimaciones de dosis, a través de códigos de cálculo y redes de vigilancia radiológica ambiental.

Desde el punto de vista físico (figura. S.9.4), la Salem está dividida en una serie de salas, atribuidas a los distintos grupos operativos:

- Sala de Dirección de Emergencias.
- Sala del Grupo de Análisis Operativo.
- Sala del Grupo Radiológico.
- Sala del Grupo de Información y Comunicación.
- Sala del Grupo de Coordinación.

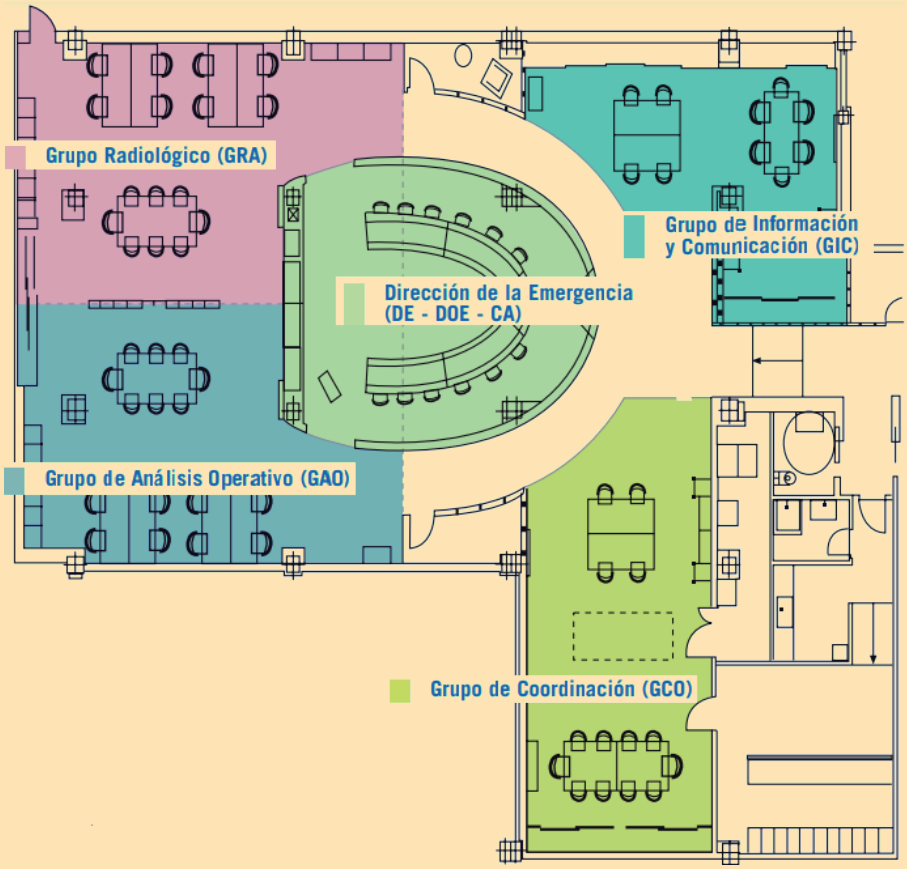


Figura S.9.4.
Plano general de la Sala de Emergencias del CSN.

Para ampliar información sobre la ORE se pueden consultar los siguientes documentos

- INT-08-01 Organización de Respuesta y Plan de Actuación ante Emergencias del Consejo de Seguridad Nuclear
- INT-08.03 Participación del Consejo de Seguridad Nuclear en el Sistema Nacional de Protección Civil. Carta de servicios del CSN ante emergencias nucleares y radiológicas
- FDE-02.01–MARNA Mapa de radiación gamma natural de España
- FDE-02.04–Salem–Sala de Emergencias CSN
- Salem–Sala de Emergencias CSN (infografía)

Escala INES

La Escala INES es un instrumento que se utiliza en todo el mundo para comunicar al público información sistemática acerca de la importancia de los sucesos nucleares y radiológicos desde el punto de vista de la seguridad.

Así como sin las escalas Richter o Celsius no sería fácil entender la información sobre los terremotos o la temperatura, la Escala INES indica la importancia de los sucesos derivados de una amplia gama de actividades, que abarcan el uso industrial y médico de fuentes de radiación, la explotación de instalaciones nucleares y el transporte de materiales radiactivos.

Con arreglo a esta escala, los sucesos se clasifican en siete niveles (figura S.9.5). Los sucesos de los niveles 1 a 3 se denominan "incidentes", mientras que en el caso de los niveles 4 a 7 se habla de "accidentes". Cada ascenso de nivel en la escala indica que la gravedad de los sucesos es, aproximadamente, diez veces superior. Cuando los sucesos no revisten importancia desde el punto de vista de la seguridad se los denomina "desviaciones" y se clasifican por debajo de la escala como nivel 0.



Figura S.9.5. Descripción general de los niveles de la escala INES.

En la Escala INES los accidentes e incidentes nucleares y radiológicos se clasifican por referencia a tres áreas de impacto (figura S.9.6):

- **Las personas y el medio ambiente**: se refiere a las dosis de radiación en personas situadas cerca del lugar donde ocurre un suceso y a la liberación no prevista, en un área amplia, de materiales radiactivos fuera de una instalación.

- **Barreras y controles radiológicos**: abarca sucesos que no tienen impacto directo en las personas y el medio ambiente y se refiere únicamente al interior de grandes instalaciones. Niveles altos de radiación no previstos y liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos confinados en las instalaciones.

- **Defensa en profundidad**: también abarca sucesos que no afectan a las personas ni al medio ambiente, pero en cuyo caso el conjunto de medidas establecidas para prevenir accidentes no funciona conforme a lo previsto.

La INES se aplica a cualquier suceso asociado con el transporte, almacenamiento y uso de materiales radiactivos y fuentes de radiación, con independencia de que ocurra o no en una instalación. Su utilización abarca una amplia gama de prácticas, con inclusión del uso industrial, como la radiografía, el uso de fuentes de radiación en hospitales, la actividad en instalaciones nucleares y el transporte de materiales radiactivos.

También se incluye la pérdida o el robo de fuentes o bultos radiactivos y el hallazgo de fuentes huérfanas, por ejemplo, fuentes transferidas involuntariamente al comercio de chatarra.

Cuando un dispositivo se utiliza con fines médicos (por ejemplo, radiodiagnóstico o radioterapia), se utiliza la escala INES para clasificar los sucesos que provocan la exposición real de trabajadores o del público, o que entrañan el deterioro del dispositivo o deficiencias en las disposiciones de seguridad. Actualmente, la escala no se utiliza para determinar las consecuencias reales o potenciales de la exposición de pacientes en el contexto de un procedimiento médico.

La escala está concebida para su uso exclusivo en aplicaciones civiles (no militares) y se aplica únicamente a los aspectos de seguridad de los sucesos. La INES no tiene por objeto clasificar sucesos relacionados con la seguridad física ni actos dolosos cometidos con el propósito de exponer a radiación a las personas.

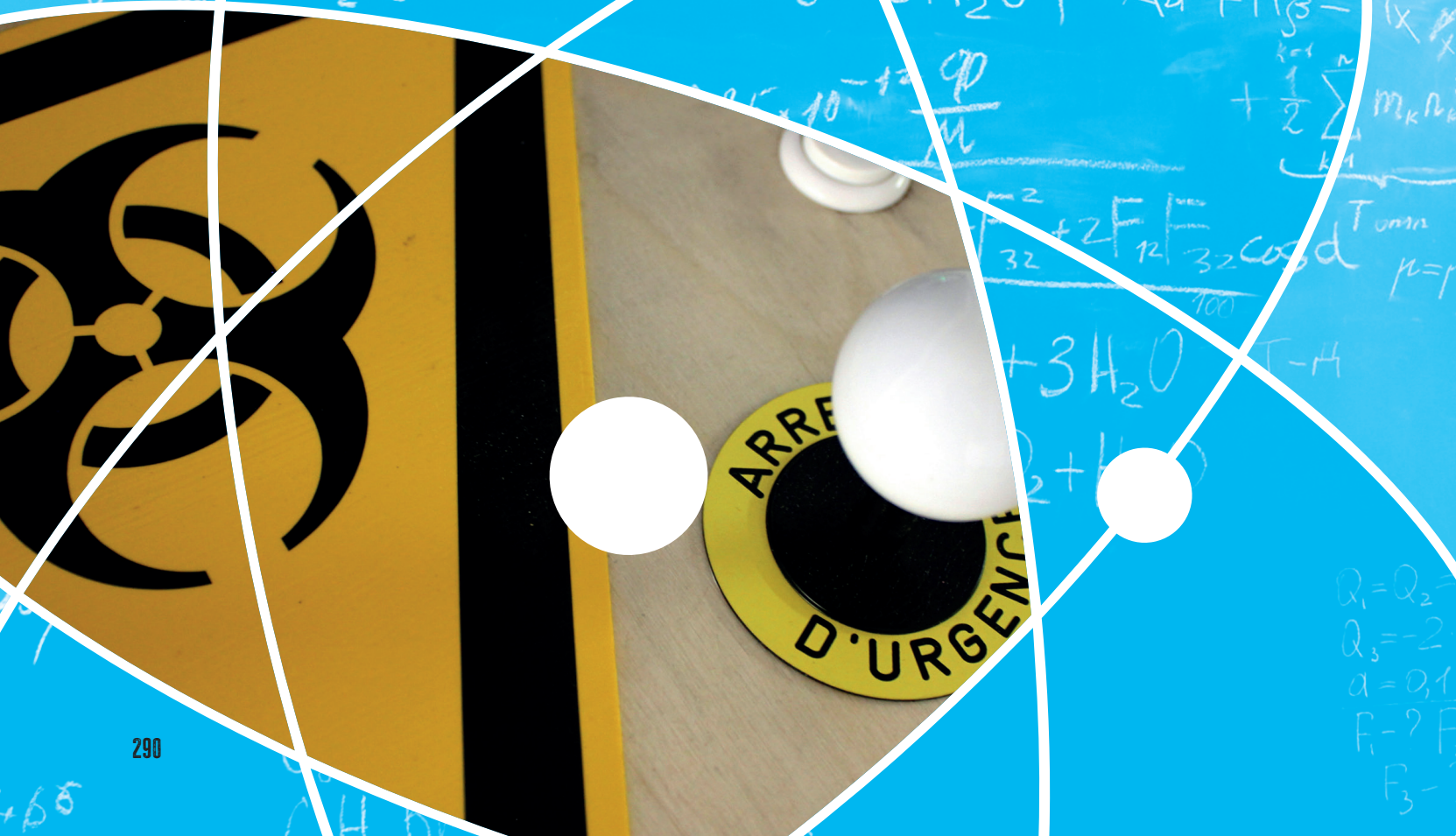
INES. Escala Internacional de sucesos nucleares y radiológico

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS NIVELES DE LA INES			
Nivel de la INES	Personas y medio ambiente	Barreras y controles radiológicos	Defensa en profundidad
Accidente grave **Nivel 7**	• Liberación grave de materiales radiactivos con amplios efectos en la salud y el medio ambiente, que requiere la aplicación y prolongación de las contramedidas previstas		
Accidente importante **Nivel 6**	• Liberación importante de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de las contramedidas previstas		
Accidente con consecuencias de mayor alcance **Nivel 5**	• Liberación limitada de materiales radiactivos, que probablemente requiere la aplicación de algunas de las contramedidas previstas. • Varias defunciones por radiación	• Daños graves en el núcleo del reactor. • Liberación de grandes cantidades de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de exposición del público; provocada posiblemente por un incendio o un accidente de criticidad grave	
Accidente con consecuencias de alcance local **Nivel 4**	• Liberación menor de materiales radiactivos, con escasa probabilidad de tener que aplicar las contramedidas previstas, salvo los controles locales de alimentos. • Al menos una defunción por radiación.	• Fusión de combustible o daño al combustible, que provoca una liberación superior al 0,1% del inventario del núcleo. • Liberación de cantidades considerables de materiales radiactivos dentro de una instalación, con alta probabilidad de importante exposición del público.	
Incidente importante **Nivel 3**	• Exposición diez veces superior al límite anual establecido para la exposición de los trabajadores. • Efecto no letal de la radiación en la salud (por ejemplo, quemaduras)	• Tasas de exposición superiores a 1 Sv/h en una zona de operación. • Contaminación grave en una zona no prevista en el diseño, con escasa probabilidad de exposición importante del público	• Cuasi accidente en una central nucleoeléctrica sin disposiciones de seguridad pendientes de aplicación. • Pérdida o robo de fuentes selladas de radiactividad alta. • Entrega equivocada de fuentes selladas de radiactividad alta, sin que existan procedimientos adecuados para manipularlas
Incidente **Nivel 2**	• Exposición de una persona del público por encima de 10 mSv. • Exposición de un trabajador por encima de los límites anuales reglamentarios.	• Niveles de radiación superiores a 50 mSv/h en una zona de operación. • Contaminación importante dentro de una instalación en una zona no prevista en el diseño	• Fallos importantes en las disposiciones de seguridad, aunque sin consecuencias reales. • Hallazgo de una fuente sellada huérfana, de un dispositivo o de un embalaje para el transporte de radiactividad alta, con indicación de las disposiciones de seguridad, sin que haya habido menoscabo. • Embalaje inadecuado de una fuente sellada de radiactividad alta.
Anomalía **Nivel 1**			• Sobreexposición de una persona del público por encima de los límites anuales reglamentarios. • Problemas menores en componentes de seguridad. con importantes medidas de defensa en profundidad pendientes de aplicación. • Pérdida o robo de fuentes radiactivas, de dispositivos o de embalaje para el transporte de actividad baja
Sin significación para la seguridad (Debajo de la escala/ Nivel 0)			

Figura S.9.6. Descripción de los niveles de la INES.



GLOSARIO



Actínidos. Radionucleidos de número atómico comprendido entre 89 (actinio) y 103 (laurencio).

ADN. Ácido desoxirribonucleico. Tipo de ácido nucleico, una macromolécula que forma parte de todas las células. Contiene la información genética usada en el desarrollo y el funcionamiento de los organismos vivos conocidos y de algunos virus, siendo el responsable de su transmisión hereditaria.

ALARA. Del inglés, *As Low As Reasonably Achievable*. Principio de la protección radiológica que proclama la necesidad de que las exposiciones a la radiación sean mantenidas a niveles tan bajos como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales.

Alternador. Máquina eléctrica capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, generando una corriente alterna mediante inducción electromagnética.

Átomo. Cada uno de los corpúsculos eléctricamente neutros de los que está constituido un elemento químico. Consta de un núcleo, formado esencialmente por neutrones y protones y de una corteza de electrones.

AGP. Almacenamiento en formaciones geológicas profundas (AGP), destinado a alojar de manera definitiva el combustible gastado y los residuos de alta actividad y vida media larga.

ATI. Almacén temporal individual en seco, diseñado para alojar un número variable de contenedores con elementos combustibles gastados en su interior, residuos de alta actividad y residuos especiales, en la ubicación de cada central nuclear.

ATD. Almacén Temporal Descentralizado, formado por los ATI de una central, más las instalaciones, medidas adicionales, sistemas de seguridad y auxiliares, que permitan realizar las operaciones de mantenimiento y reparación de los contenedores y operar como instalación nuclear independiente.

Becquerel. Unidad de actividad radiactiva, de símbolo Bq. Un becquerel equivale a una desintegración nuclear por segundo.

Blindaje. Espesor de material interpuesto entre una fuente de radiación ionizante y el punto receptor, con el objeto de atenuar dicha radiación.

Bosón. En física de partículas es uno de los dos tipos básicos de partículas elementales de la naturaleza (el otro tipo son los fermiones).

BWR. Reactor nuclear de agua en ebullición.

Calor. Forma de energía asociada al movimiento de los átomos, moléculas y otras partículas que forman la materia. El calor puede ser generado por reacciones químicas (como en la combustión), nucleares (como en las que tienen lugar en el interior del Sol), disipación electromagnética (como en los hornos de microondas) o por disipación mecánica (fricción).

CERN. Centro europeo de investigación nuclear.

Ciclo del combustible nuclear. Procesos relacionados con la producción de energía nuclear que comprenden en su primera parte la obtención y utilización de los materiales nucleares utilizados en la explotación de reactores nucleares y, en su segunda parte, el almacenamiento, reproceso y evacuación de los mismos.

Condensador. Es un elemento intercambiador térmico, en el cual se pretende que cierto fluido que lo recorre, cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor con otro medio.

Contaminación radiactiva. Presencia indeseada de sustancias radiactivas en la superficie o en el interior de un cuerpo u organismo.

Cosmogénico (nucleido). Aquel formado por interacción de los rayos cósmicos (producidos por el Sol) con núcleos de átomos de la atmósfera o de la superficie terrestre.

Cromosoma. Filamento condensado de ácido desoxirribonucleico (ADN) que contiene los genes.

Detector. Dispositivo destinado a detectar la radiación.

Dosímetro. Dispositivo de pequeñas dimensiones que permite calcular la dosis de radiación que recibe la persona que lo lleva.

Dosis absorbida. Energía cedida por la radiación ionizante a la unidad de masa del material irradiado. Su unidad de medida es el gray (Gy).

Dosis equivalente. Dosis absorbida en un tejido u órgano corregida por el distinto daño en función del tipo y la calidad de la radiación (factores de ponderación de la radiación). Su unidad de medida es el sievert (Sv).

Dosis efectiva. Dosis equivalente corregida por la diferente sensibilidad al daño de los diferentes órganos y tejidos (factores de ponderación de los tejidos). Su unidad de medida es el sievert (Sv).

Edificio de contención. Barrera de seguridad construida para albergar un reactor nuclear que consiste en una estructura de hormigón, acero o una combinación de ambos. Está diseñado para que, en caso de emergencia, pueda contener los materiales radiactivos.

Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Transformaciones producidas por la radiación ionizante cuando incide en un organismo vivo, como por ejemplo el cuerpo humano. Estos efectos son de dos clases: deterministas o estocásticos.

Efectos o reacciones tisulares (también nombrados como efectos deterministas). Son aquellos efectos biológicos en los que hay una relación causal entre la dosis y el efecto. Únicamente se manifiestan cuando la dosis alcanza o supera un determinado valor (llamado nivel umbral). Su gravedad depende, por tanto, de la dosis recibida. Algunos ejemplos son el enrojecimiento de la piel, la caída del cabello, etc.

Efectos estocásticos. Son aquellos efectos biológicos en los que la relación entre dosis y efecto es de naturaleza probabilística. Carecen de dosis umbral y su gravedad no depende linealmente de la dosis recibida. Están representados por la generación de tumores y la producción de alteraciones hereditarias.

Electrón. Partícula elemental estable, que forma parte de los átomos y que posee carga eléctrica negativa.

Electrón-voltio. Energía adquirida por un electrón acelerado por un potencial de 1 voltio.

Elemento combustible. Dispositivo que contiene los materiales nucleares que se alojan en un reactor nuclear para producir energía.

Energía. Magnitud física conservativa que expresa la capacidad de un sistema para producir trabajo y calor. Su unidad de medida es el julio ($1\ eV = 1{,}6 \times 10^{-19}$ julio). Según la forma o el sistema físico en que se manifiesta, se consideran diferentes tipos de energía: electromagnética, térmica, eléctrica, luminosa, mecánica, química, nuclear, etc.

Espectro electromagnético. Representación de los distintos tipos de ondas electromagnéticas donde se muestra su localización respecto a su longitud de onda o frecuencia.

EURATOM. Comunidad Europea de la Energía Atómica.

Exposición externa a la radiación. La que se produce cuando la fuente emisora de radiaciones está separada del individuo potencial receptor de la misma.

Exposición interna a la radiación. La que se produce cuando la fuente emisora de radiaciones ha sido incorporada por un individuo a su organismo mediante ingestión o inhalación.

Fisión nuclear. Es una reacción que tiene lugar en el núcleo del átomo (reacción nuclear). La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños, además de algunos subproductos. Estos incluyen neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones y positrones de alta energía). La fisión de núcleos pesados es un proceso exotérmico, lo que supone que se liberan cantidades sustanciales de energía.

Fotón. Cuanto elemental de energía electromagnética.

Frecuencia. Es una medida que se utiliza generalmente para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo

Fuerzas nucleares. Aquellas que tienen origen exclusivamente en el interior de los núcleos atómicos. Existen dos fuerzas nucleares, la fuerza fuerte que actúa sobre los nucleones y la fuerza débil que actúa en el interior de los mismos.

Fusión nuclear. Proceso por el cual varios núcleos atómicos de carga similar se unen para formar un núcleo más pesado. Se acompaña de la liberación o absorción de energía, que permite a la materia entrar en un estado plasmático.

Gammagrafía. En medicina, es una prueba diagnóstica que se basa en la imagen que producen las radiaciones generadas tras la inyección o inhalación en el organismo de sustancias que contienen isótopos radiactivos. La emisión radiactiva es captada por un aparato detector llamado gammacámara que procesa los datos recibidos que posteriormente y mediante tratamiento informático servirán para formar una imagen tridimensional.

Generador de vapor. Es un intercambiador de calor que transmite calor del circuito primario, por el que circula el agua que se calienta en un reactor nuclear, al circuito secundario, transformando el agua en vapor de agua que posteriormente se expande en las turbinas.

Gluón. Es el bosón portador de la interacción nuclear fuerte, una de las cuatro fuerzas fundamentales. No posee masa ni carga eléctrica, pero sí carga de color.

Gray. Unidad de dosis de radiación absorbida, de símbolo Gy.

Hadrón. Es una partícula subatómica que experimenta la interacción nuclear fuerte. Puede ser una partícula elemental o una partícula compuesta. Los neutrones y protones son ejemplos de hadrones.

Hertzio. Unidad de frecuencia. Hz, equivalente a un ciclo por segundo.

ICNIRP. Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones no Ionizantes.

CIPR. (ICRP). Comisión Internacional de Protección Radiológica.

CIUMR. (ICRU) Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas.

Ion. Átomo o grupo de átomos, que por pérdida o ganancia de uno o más electrones ha adquirido una carga eléctrica neta.

Ionización. Acción y efecto de producir iones

Isótopo. Todos los tipos de átomos de un mismo elemento, que tienen el mismo número atómico pero diferente masa atómica.

ITER. Reactor Termonuclear Experimental Internacional.

Kaón. En física de partículas, un kaón (también conocido como mesón K y representado como K) es cualquier partícula del grupo de cuatro mesones que tienen un número cuántico llamado extrañeza. A pesar de que se generaban mediante interacción fuerte, el hecho inesperado de que decayeran por interacción débil hacía que estos tuvieran una vida media mayor de la prevista. Por este motivo fueron llamadas en un inicio como "partículas extrañas" lo que acabó por dar nombre al nuevo número cuántico descubierto, la extrañeza. En el modelo quark los kaones contienen dos quarks, siendo uno de ellos un quark o antiquark extraño.

Leptón. En física, un leptón es una partícula con espín -1/2 (un fermión) que no experimenta interacción fuerte (esto es, la fuerza nuclear fuerte). Los leptones forman parte de una familia de partículas elementales conocida como la familia de los fermiones, al igual que los quarks. Un leptón es un fermión fundamental sin carga hadrónica o de color.

Longitud de onda. Distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos. Su unidad de medida es el metro.

Luz. Rango de radiaciones electromagnéticas detectadas por el ojo humano, aproximadamente correspondiente al rango de longitudes de onda de $4x10^{-7}$ y $1x10^{-7}$ m.

Medicina nuclear. Especialidad de la medicina actual en la que se utilizan radiotrazadores o radiofármacos, que están formados por un fármaco transportador y un isótopo radiactivo. Estos radiofármacos se aplican dentro del organismo humano por diversas vías (la más utilizada es la vía intravenosa). Una vez que el radiofármaco está dentro del organismo, se distribuye por diversos órganos, con un objetivo diagnóstico o terapéutico.

Moderador. En un reactor nuclear, el moderador es un elemento que disminuye la velocidad de los neutrones, permitiendo de esta forma una reacción nuclear en cadena eficaz. El elemento que actúa de moderador suele ser: hidrógeno, deuterio (presente en el agua pesada) o carbono.

Neutrino. Partícula subatómica de tipo fermiónico, de carga neutra y espín 1/2. Los últimos estudios han confirmado que los neutrinos tienen masa, aunque el valor de esta no se conoce con exactitud, en todo caso, sería muy pequeño habiéndose obtenido tan solo cotas superiores con valores aproximadamente 200 000 veces más pequeños que la masa del electrón. Además, su interacción con las demás partículas es mínima por lo que pasan a través de la materia ordinaria sin apenas perturbarla.

Neutrón. Partícula de carga eléctrica nula constituyente de los núcleos atómicos. Fuera del núcleo es inestable. Con una vida media de 1010±30 s.

Número atómico. Número de protones en el átomo, que determina propiedades químicas del elemento químico. Su símbolo es Z.

Número másico. Número de nucleones presentes en el núcleo atómico, es decir, la suma de sus protones y neutrones. Se simboliza con la letra A.

OIEA. Organismo Internacional de la Energía Atómica.

Onda. Fenómeno físico a través del cual una perturbación se propaga desde el foco hacia otras regiones del espacio.

Onda electromagnética. Onda producida por la aceleración de una carga eléctrica. Puede propagarse a través de medios materiales e incluso en el vacío.

Onda mecánica. Onda que necesita de un medio material para propagarse.

Ondas de radio. Ondas electromagnéticas (de radiofrecuencia) cuya longitud de onda oscila entre varios kilómetros y pocos milímetros. Son ondas poco energéticas y se utilizan en las comunicaciones por radio.

Partícula β. Emisión de electrones o positrones (antipartícula del electrón) de alta energía, procedentes de la desintegración radiactiva de núcleos atómicos.

Partícula α. Partícula de carga positiva, formada por dos protones y dos neutrones. Idéntica al núcleo del átomo de helio.

Periodo de semidesintegración. Tiempo necesario para la desintegración de la mitad de los átomos presentes en una muestra de un determinado radionucleido.

Pión. En física de partículas, es el nombre común de tres partículas subatómicas descubiertas en 1947. El pion es el mesón más ligero.

Plasma. En física y química, se denomina plasma a un gas constituido por partículas cargadas (iones) libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las

mismas. Con frecuencia se habla del plasma como un estado de agregación de la materia con características propias, diferenciándolo de este modo del estado gaseoso, en el que no existen efectos colectivos importantes.

Plomo. Elemento químico de número atómico 82 y símbolo Pb. Es un excelente material de blindaje contra los rayos X y gamma, mientras que es casi transparente para los neutrones.

Plutonio. De símbolo Pu, es un elemento metálico radiactivo que se utiliza en reactores y armas nucleares. Su número atómico es 94. Es uno de los elementos transuránicos del grupo de los actínidos del sistema periódico.

Productos de fisión. Radionucleidos generados directamente por fisión nuclear o indirectamente por desintegración de los fragmentos de fisión.

Protección radiológica. Disciplina que tiene como objetivo prevenir y limitar los riesgos de la recepción de dosis de radiación ionizante y mitigar sus efectos.

Protón. Partícula estable que forma parte del núcleo atómico y cuya carga eléctrica es positiva e igual a la del electrón y cuya masa es de $1{,}67\ 10^{-27}$ g.

Protonterapia. Técnica de radioterapia que emplea haces de protones, con el objetivo de depositar la dosis prescrita en el volumen tumoral minimizando la irradiación de los tejidos circundantes, gracias a las forma particular con que estas partículas cargadas depositan la dosis en el tejido.

PWR. Reactor nuclear de agua a presión.

Quark. En física de partículas, junto con los leptones, son los constituyentes fundamentales de la materia y las partículas más pequeñas que el ser humano ha logrado identificar. Varias especies de quarks se combinan de manera específica para formar partículas tales como protones y neutrones.

Radiación. Fenómeno que consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

Radiación cósmica. Radiación formada por partículas de origen extraterrestre dotadas de gran energía y por las partículas creadas por ellas al interaccionar con la atmósfera.

Radiación electromagnética. Radiación caracterizada por la variación de los campos eléctrico y magnético, en forma de ondas.

Radiación ionizante. Nombre genérico empleado para designar las radiaciones de naturaleza corpuscular o electromagnética que en su interacción con la materia producen iones, bien directa o indirectamente.

Radiación solar. Energía que se propaga en el espacio procedente del Sol.

Radiactividad. Fenómeno físico natural, por el cual elementos químicos llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc.

Radiactividad artificial. Radiactividad inducida cuando se bombardean ciertos núcleos estables con partículas apropiadas. Si la energía de estas partículas tiene un valor adecuado penetran dentro del núcleo bombardeado y forman un nuevo núcleo que, en caso de ser inestable, se desintegra después radiactivamente.

Radiactividad natural. Aquella radiactividad que existe en la naturaleza sin que haya existido intervención humana. Puede provenir de dos fuentes: materiales radiactivos existentes en la Tierra desde su formación, los llamados primigenios y materiales radiactivos generados por la interacción de los rayos cósmicos con los materiales de la Tierra que originalmente no eran radiactivos, los llamados cosmogénicos.

Radical libre. Molécula (orgánica o inorgánica), en general extremadamente inestable y, por tanto, con gran poder reactivo. Se pueden sintetizar en el laboratorio, se pueden formar en la atmósfera por radiación, y también se forman en los organismos vivos (incluido el cuerpo humano) por el contacto con el oxígeno y actúan alterando las membranas celulares y atacando el material genético de las células, como el ADN.

Radiobiología. Disciplina científica que estudia los fenómenos que se producen en los seres vivos tras la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes.

Radiodiagnóstico. Especialidad médica que se ocupa de generar imágenes del interior del cuerpo mediante diferentes agentes físicos (rayos X, ultrasonidos, campos magnéticos, etc.) y de utilizar estas imágenes para el diagnóstico y, en menor medida, para el pronóstico y el tratamiento de las enfermedades.

Radiografía. Procedimiento para obtener imágenes de la estructura interna de un objeto cuando lo atraviesa un haz de rayos X. Por extensión se aplica también a imágenes obtenidas mediante otros tipos de radiación ionizante.

Radionucleido. Isótopo radiactivo de un elemento, llamado también radioisótopo.

Radioterapia. Tipo de tratamiento oncológico que utiliza las radiaciones para eliminar las células tumorales, (generalmente cancerígenas), en la parte del organismo donde se apliquen (tratamiento local). La radioterapia actúa sobre el tumor, destruyendo las células malignas y así impide que crezcan y se reproduzcan. Esta acción también puede ejercerse sobre los tejidos normales; sin embargo, los tejidos tumorales son más sensibles a la radiación y no pueden reparar el daño producido de forma tan eficiente como lo hace el tejido normal, de manera que son destruidos bloqueando el ciclo celular.

Radón. Elemento químico radiactivo perteneciente al grupo de los gases nobles. En su forma gaseosa es incoloro, inodoro e insípido (en forma sólida su color es rojizo). En la tabla periódica tiene el número 86 y símbolo Rn. Es producto de la desintegración del radio (Ra=88).

Rayos γ. Radiación electromagnética emitida durante una desexcitación nuclear o un proceso de aniquilación de partículas. Su longitud de onda es inferior a 1 nanómetro (10-9 m) y en general, es menor que la de los rayos X, por lo que se trata de una radiación muy penetrante.

Rayos infrarrojos. Radiación electromagnética con una frecuencia más baja que la microondas y más alta que la óptica. Su longitud de onda es de 10^{-3} a 10^{-6} m. La radiación infrarroja puede detectarse como calor.

Rayos ultravioleta (UV). Radiación electromagnética cuya frecuencia es mayor que la de la luz visible pero menor que la de los rayos X. Su longitud de onda se encuentra aproximadamente entre los $4x10^{-7}$ y $1.5x10^{-8}$ m. Su nombre proviene de que su rango empieza en longitudes de onda más cortas de lo que los humanos identificamos como el color violeta. La fuente más habitual de rayos ultravioletas es el Sol, pero la capa de ozono en la estratosfera filtra la mayor parte de estos, protegiéndonos de las quemaduras y de otros efectos adversos para la salud que puede producir esta radiación.

Rayos UVA. Subtipo de radiación ultravioleta de onda larga (400-320 nanómetros) y con una energía por fotón entre 3,10 y 3,87 electronvoltios.

Rayos X. Radiación electromagnética producida en las transiciones de electrones de los niveles más profundos de los átomos. Su longitud de onda está comprendida, aproximadamente, entre 10^{-7} y 10^{-9}. Es por tanto menor que la de los rayos ultravioleta y mayor que la de los rayos gamma.

Reacción nuclear en cadena. Aquella que se sostiene en el tiempo al provocar un neutrón la fisión de un átomo fisible, liberándose varios neutrones que a su vez causan otras fisiones. Esta reacción en cadena solo se producirá si al menos uno de los neutrones emitidos en la fisión es apto para provocar una nueva fisión.

Reflector. Material que rodea el núcleo de los reactores nucleares con la misión de devolver a éste los neutrones que podrían perderse por escape.

Refrigerante. Fluido utilizado para absorber calor.

Riesgo. Probabilidad de que se produzca un daño de determinada gravedad.

Roentgen. Unidad de medida de la ionización producida por una radiación, de símbolo R. Un roentgen produce en 1 kg de aire una ionización tal que se forman 2.58 10^{-4} culombios/kg.

Sievert. Unidad de dosis equivalente efectiva, de símbolo Sv.

Sonido. Vibración mecánica transmitida por un medio elástico y que es percibida por nuestro oído.

TC. Acrónimo de tomografía computarizada, prueba diagnóstica tradicionalmente conocida como escáner, que hace incidir sobre el paciente un haz de radiación girando alrededor del eje longitudinal del cuerpo a la vez que se hace avanzar este, para obtener imágenes anatómicas de su interior reconstruidas en cortes o en una imagen tridimensional.

Teragnosis. Procedimientos de medicina nuclear, en los que una misma molécula (ligando), que tiene afinidad por unirse a estructuras muy específicas de las células, tejidos, etc. se combina con radiotrazadores adecuados para el diagnóstico y con radiofármacos destinados a la terapia, de manera que la captación precisa que describen los radiotrazadores es seguida por una terapia muy dirigida hacia esas zonas concretas.

Torio. Elemento químico de número atómico 90 y símbolo Th. Pertenece a la serie de los actínidos. Todos sus isótopos son radiactivos y varios de ellos existen en la corteza terrestre de modo natural. Destaca el ^{232}Th, padre de la serie radiactiva natural del torio.

Tokamak. Cámara toroide con bobinas magnéticas, cuyo objetivo es obtener la fusión de las partículas del plasma, lo que generaría grandes cantidades de energía.

Turbina. Motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice.

UNSCEAR. Comité Científico de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas.

Uranio. Elemento químico de número atómico 92 y símbolo U. Pertenece a la serie de los actínidos. Todos sus isótopos son radiactivos. Es un material fisionable y el combustible por excelencia de los reactores nucleares de fisión, gracias a su isótopo natural ^{235}U.

Uranio enriquecido. Aquel que contiene un porcentaje del isótopo uranio-235 superior al presente en la naturaleza (0,71 %).

Vaina de combustible. Tubo metálico de una aleación resistente a la corrosión que contiene las pastillas de combustible y que se encuentra cerrado mediante tapones soldados en sus extremos. Los tubos con su carga de pastillas son llamados barras combustibles.

BIBLIOGRAFÍA



- ¿Qué es el átomo? CSN, 2007 (póster).
- Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR), BOE de 29 de julio de 2009.
- Alonso, Agustín. Léxico de Términos Nucleares. Publicaciones Científicas de la Junta de Energía Nuclear, 1973.
- Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG), publicado por la Organización Marítima Internacional, OMI. 2009.
- Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Residuos Radiactivos. Viena, 5 de septiembre de 1997. BOE n.° 97 de 23 de abril de 2001.
- Desmantelamiento y clausura de centrales nucleares. CSN, 2008 (36 págs.).
- El CSN ante las emergencias nucleares: guía pedagógica. CSN, MEC, 2005 (CD).
- El CSN y la protección radiológica: guía pedagógica. CSN, MEC, 2006 (CD).
- El CSN y la vigilancia radiológica del medio ambiente: guía para el profesorado. CSN, MEC, 2007 (40 págs.). Actualizado 2025.
- El CSN y las radiaciones: guía pedagógica. CSN, MEC, 2004 (CD).
- El funcionamiento de las centrales nucleares. CSN, 2000 (24 págs.).
- El transporte de los materiales radiactivos. CSN, 2009 (28 págs.).
- Espectro de ondas electromagnéticas. CSN, 2007(póster).
- ICRP. Recomendaciones del Comité Internacional de Protección Radiológica. Publicaciones 60 (1990) y 103 (2007).
- Información para médicos prescriptores de pruebas de radiodiagnóstico y medicina nuclear en el paciente pediátrico. CSN, 2006 (tríptico).
- Instrucciones técnicas para el transporte sin riesgo de mercancías peligrosas por vía aérea. OACI, 2009.
- Protección de las trabajadoras gestantes expuestas a radiaciones ionizantes en el ámbito sanitario. CSN, 2024.
- La protección radiológica en el medio sanitario. CSN, 2004 (54 págs.). Actualizado 2025.

- La protección radiológica en la industria, la agricultura, la docencia o la investigación. CSN, 2004 (56 págs.).
- La radiación artificial: impactos sobre el medio ambiente. CSN, 2003 (póster).
- Las radiaciones en la vida diaria. CSN, 2006 (20 págs.).
- Ley 15/1980, de 22 de abril, de Creación del Consejo de Seguridad Nuclear. BOE 25 de abril de 1980.
- Ley 25/1964, de 29 de abril sobre Energía Nuclear. BOE de 4 de mayo de 1964.
- Martín Municio, Ángel y Colino Martínez, Antonio. Diccionario Español de la Energía. Enresa, 2003 (816 págs.).
- Ortega Arambur, Xavier y Jordán Bisbal, Jaume. Radiaciones Ionizantes. Utilización y riesgos (Tomos I y II). Ed.1996.
- Preguntas frecuentes sobre el transporte de equipos radiactivos de medida de densidad y humedad en suelos y de gammágrafos industriales. CSN, 2007 (tríptico).
- Protección radiológica. CSN, 2008 (16 págs.) Actualizado 2025.
- Radiación y protección radiológica: Guía didáctica para centros de enseñanza primaria. CSN, MEC, 2009 (120 págs.).
- Radón: un gas natural de origen radiactivo en su casa. CSN, Universidad de Cantabria, 2003 (CD).
- Plan Nacional contra el Radón. Ministerio de Sanidad, 2024.
- Consenso europeo sobre el uso de blindajes sobre pacientes. https://seguridaddelpaciente.sanidad.gob.es/informacion/eventos/jornadas/2022/docs/6_Luis_Rincon__SEGRA.pdf
- Campaña europea de comunicación para promover el uso adecuado de las pruebas de imagen médica (HERCA). https://www.csn.es/asociacion-europea-autoridades-competentes-proteccion-radiologica-herca
- Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalación y Utilización de Aparatos de Rayos X con fines de diagnóstico médico. BOE de 18 de julio de 2009.

- Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.

- Real Decreto 1217/2024, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes. BOE de 4 de diciembre de 2024.

- 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. BOE de 21 de diciembre de 2022.

- Reglamento Internacional sobre el Transporte de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril (RID), BOE de 14 de agosto de 2009.

- Tercer informe nacional de España para la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Residuos Radiactivos. Octubre 2008. www.csn.es y www.mityc.es.

- Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.

- Utilización de la energía nuclear para producir electricidad. CSN, 2005 (20 págs.)

- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, 20 enero 2020. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

- VII Plan General de Residuos Radiactivos, aprobado en el Consejo de Ministros celebrado el 27 de diciembre de 2023. https://www.miteco.gob.es/es/energia/nuclear/residuos/plan-general.html

- V Plan General de Residuos Radiactivos, aprobado en el Consejo de Ministros.

Páginas web

- Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA): www.irpa.net.

- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat): www.ciemat.es.

- Comisión internacional de Protección contra las radiaciones no ionizantes: www.icnirp.de.

- Comisión Internacional de Protección radiológica (ICRP): www.icrp.org.
- Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (ICRU): www.icru.org.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN): www.csn.es.
- Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa): www.enresa.es.
- Foro Nuclear: www.foronuclear.org.
- Ministerio de Educación, Política Social y Deporte: www.educacionfpydeportes.gob.es.
- Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA): www.iaea.org.
- Sociedad Española de Física Médica (SEFM): www.sefm.es.
- Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular (SEMNIM): www.semnim.es.
- Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR): www.sepr.es.
- Sociedad Nuclear Española (SNE): www.sne.es.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico. https://www.miteco.gob.es/.

Esta guía didáctica ha sido actualizada y revisada por el siguiente grupo de trabajo

- **Juan Francisco Navarro Amaro**. CIEMAT.
- **Joana Martínez Ratia**. Universitat Rovira i Virgili.
- **Marina Sáez Muñoz**. Universitat Politècnica de València.
- **María Luisa Mota Pérez**. Universitat Politècnica de Catalunya.
- **Rocío Escudero Toro**. Centro Nacional de Investigaciones Cardiovasculares Carlos III (F.S.P).
- **Fernando Sierra Díaz**. Hospital General Universitario Gregorio Marañón de Madrid.
- **Ana María Hernández Álvarez**. CSN.
- **Marina Sánchez Sánchez**. CSN.
- **Antonio Ortiz Olmo**. CSN.

GUÍA DIDÁCTICA PARA CENTROS DE ENSEÑANZA SECUNDARIA

RADIACIÓN Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA



CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

SEPR SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

isftic Instituto Superior de Formación y Recursos en Red para el Profesorado

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CULTURA