

Radiación y protección radiológica

Guía didáctica para centros
de enseñanza secundaria



Radiación y protección **radiológica**

Guía didáctica para centros
de enseñanza secundaria



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN

isftic

Instituto Superior de Formación y
Recursos en Red para el Profesorado

índice

© copyright 2010

Consejo de Seguridad Nuclear

edita y distribuye

Consejo Seguridad Nuclear

C/ Pedro Justo Dorado Dellmans, 11

28040 Madrid

peticiones@csn.es

proyecto gráfico

base 12 diseño y comunicación

impreso en papel reciclado



4		Prólogo
6		Enfoque general
8		Objetivos
10		Estructura
12		Contenido



14 | Nivel I (alumnado de 12 a 16 años)

- 18 | **Unidad 1** La radiación está en todas partes
- 26 | **Unidad 2** ¿Qué es la radiación ionizante?
- 32 | **Unidad 3** ¿Cómo detectar la radiación ionizante?
- 38 | **Unidad 4** ¿Cómo afecta a nuestro cuerpo la radiación ionizante?
- 44 | **Unidad 5** Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes
- 50 | **Unidad 6** Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en industria e investigación
- 56 | **Unidad 7** Obtención de energía de origen nuclear



64 | Nivel II (alumnado de 16 a 18 años)

- 68 | **Unidad 1** Radiación ionizante en la vida diaria
- 78 | **Unidad 2** La radiación ionizante y sus efectos biológicos
- 84 | **Unidad 3** Protección contra la radiación ionizante
- 92 | **Unidad 4** Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes
- 102 | **Unidad 5** Otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes
- 110 | **Unidad 6** Obtención de energía de origen nuclear
- 122 | **Unidad 7** Los residuos radiactivos

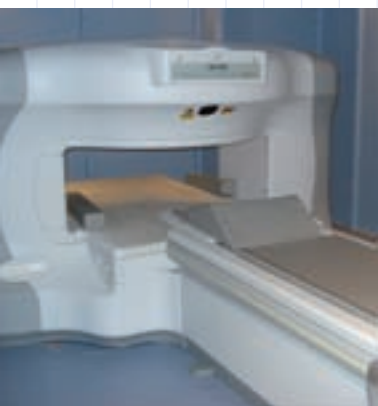


130 | Suplemento técnico

- 132 | 1. Antecedentes históricos
- 137 | 2. La estructura del átomo
- 140 | 3. Espectro de ondas electromagnéticas: radiación ionizante y no ionizante
- 144 | 4. Radiactividad y radiaciones ionizantes
- 149 | 5. Efectos biológicos de la radiación: aspectos legales
- 153 | 6. Ciclo del combustible nuclear y funcionamiento de las centrales nucleares
- 158 | 7. Otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes
- 167 | 8. Residuos radiactivos: origen y gestión
- 174 | 9. El Consejo de Seguridad Nuclear

180		Glosario
188		Bibliografía

prólogo



Desde el Consejo de Seguridad Nuclear, y con la autorización de la Comisión Europea, se ha actualizado y editado en dos volúmenes el *Curso para escuelas de enseñanza primaria y secundaria. Radiación y protección radiológica*; una experiencia puesta en marcha por la Dirección General XI (Medio Ambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil) de la Comisión Europea.

El objetivo de esta guía didáctica es ofrecer al profesorado de enseñanza secundaria un manual que sirva para introducir a los alumnos y alumnas en los usos y aplicaciones de las radiaciones ionizantes.

Vivimos inmersos en sociedades del conocimiento donde el saber y la información constituyen los pilares sobre los que nuestras sociedades se sustentan, siendo el conocimiento un factor fundamental en nuestras vidas. Este conocimiento es absolutamente necesario para acercarse al mundo de las radiaciones ionizantes. Sabemos también que es un mundo que no podemos obviar, ya que desde los primeros momentos de nuestra existencia estamos expuestos a las radiaciones, pero además no es menos cierto que es un campo en continuo crecimiento, tanto desde el punto de vista médico como industrial.

Sin embargo, también sabemos que el desconocimiento en ésta y otras materias genera desconfianza y temor, por eso desde el Consejo de Seguridad Nuclear estamos convencidos de que es necesaria la transparencia en la información y la comunicación.

De alguna manera podemos decir que el camino de la ciencia a lo largo de la Historia ha sido siempre el paso del mito al logos, y esto es precisamente lo que hace falta cuando nos enfrentamos al mundo de las radiaciones ionizantes: debemos observar, analizar y explicar lo que sucede, sólo así podremos actuar con una actitud crítica y responsable.

Con la reedición de este manual queremos contribuir al conocimiento y servir de apoyo a las personas encargadas de transmitirlo en las aulas. Sólo desde esta posición formaremos una ciudadanía responsable, capaz de enfrentarse con una actitud crítica a los avances científicos en general y al mundo de las radiaciones en particular.

Espero que cumpla su objetivo y aporte su pequeño granito de arena a la hora de aumentar el conocimiento sobre las radiaciones y la protección radiológica.

Carmen Martínez Ten
Presidenta 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 tenía 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 profesor construya sus propias unidades y se completa con un amplio suplemento técnico.

En estos dos niveles se subraya en especial la relación entre la radiación y las experiencias y observaciones cotidianas y personales de los alumnos y alumnas para que se sensibilicen sobre los riesgos y beneficios de la radiación ionizante y no ionizante.

objetivos



Las unidades tienen dos objetivos generales:

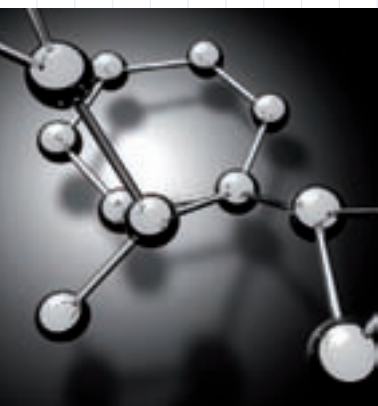
- Estimular el interés por fenómenos físicos imperceptibles
- Familiarizar al alumnado con las distintas formas de radiación (ionizante y no ionizante) procedentes tanto de fuentes naturales como artificiales.

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 los intereses y motivaciones del alumnado.

Para alcanzar estos objetivos, se han definido una serie de pautas destinadas a los profesores. En suma, éstos 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 a los alumnos. 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 esta 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



nivel I

alumnado de 12 a 16 años

- 18 | **Unidad 1**
La radiación está en todas partes
- 26 | **Unidad 2**
¿Qué es la radiación ionizante?
- 32 | **Unidad 3**
¿Cómo detectar la radiación ionizante?
- 38 | **Unidad 4**
¿Cómo afecta a nuestro cuerpo la radiación ionizante?
- 44 | **Unidad 5**
Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes
- 50 | **Unidad 6**
Aplicaciones de las radiaciones ionizantes en industria e investigación
- 56 | **Unidad 7**
Obtención de energía de origen nuclear

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 guión al profesor/a 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 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 final de este nivel los alumnos/as deben:

- Comprender el concepto de radiación y las distintas clasificaciones de las fuentes de radiación: natural y artificial, ionizante y no ionizante.
- Conocer el origen, la energía y el poder de penetración asociados a cada uno de los tipos de radiaciones ionizantes.
- Comprender que para medir la radiación ionizante se utilizan instrumentos especiales.
- Comprender los efectos biológicos asociados a la radiación ionizante y las medidas básicas de protección contra esa radiación.
- Conocer las aplicaciones médicas de la radiación ionizante y diferenciar técnicas de radiodiagnóstico, de radioterapia y de medicina nuclear.
- Conocer algunos ejemplos de aplicación de la radiación ionizante en la industria, alimentación, agricultura e investigación.
- Comprender 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.
- Conocer que existe un proyecto para la obtención de energía nuclear de fusión llamado “proyecto ITER”
- Conocer que existe el Tratado de No proliferación de Armas Nucleares.

nivel I

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

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Comprenderá el concepto de radiación.
- Entenderá las características de una onda (energía, frecuencia y longitud de onda).
- Podrá nombrar ejemplos de ondas mecánicas y ondas electromagnéticas.
- Podrá diferenciar entre fuentes de radiación natural y artificial.
- Podrá diferenciar entre fuentes de radiación ionizante y no ionizante.
- Conocerá 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) y las siguientes direcciones en Internet: <http://www.icnirp.de/> (Comisión Internacional de Protección Radiológica contra las Radiaciones no Ionizantes) y <http://www.icrp.org/> (Comisión Internacional de Protección Radiológica).

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 alumnos/as 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 en forma de ondas electromagnéticas o partículas.

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

Las ondas que se producen en un estanque al tirar una piedra son ondas mecánicas y también las ondas sísmicas producidas por un terremoto.

Las ondas de radio y la luz son ondas electromagnéticas.

La diferencia principal entre ondas mecánicas y electromagnéticas es que estas últimas no necesitan un medio material para propagarse

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

Se trata de la radiación ionizante de origen natural. Todos estamos expuestos a ella. Está en los materiales de construcción (por ejemplo granito) que contienen isótopos radiactivos o nos llega de los rayos cósmicos.

4. Enumerar alguna aplicación de la radiación ionizante en el campo de la medicina.
Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en medicina son múltiples. Con fines diagnósticos: radiografías, TAC o gammagrafía; con fines terapéuticos, los aceleradores lineales de electrones.

Verdadero o falso

Responder verdadero o falso y justificar la respuesta:

1. Las ondas de radio se utilizan en los sistemas de comunicaciones.
Verdadero. Son ondas electromagnéticas generadas artificialmente mediante un circuito oscilante. Las de menor longitud se usan en la transmisión de señales

de televisión y las de onda larga en transmisiones radiofónicas.

2. La radiación infrarroja de origen natural es la que nos llega del sol y nos calienta.
Verdadero. Es invisible pero podemos sentirla por el calor que nos transmite a la piel.
3. Los rayos UVA son un tipo de radiación ionizante.
Falso. Es radiación no ionizante.
4. Las radiaciones no ionizantes no producen efectos perjudiciales en el ser humano.
Falso. Aunque tengan menos energía que la radiación ionizante, el mal uso de las radiaciones no ionizantes puede dar lugar a posibles efectos dañinos en el cuerpo humano.

Actividades complementarias

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

FUENTES	RADIACIÓN IONIZANTE	RADIACIÓN NO IONIZANTE
Natural	· Rayos cósmicos. · Isótopos radiactivos presentes en la corteza terrestre, en los alimentos y en el agua.	· Rayos del sol (luz visible, infrarrojos, rayos UVA).
Artificial	· Aparatos para esterilización. · Radiodiagnóstico (radiografías). · Radioterapia. · Medicina nuclear. · 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, cosas sobre la radiación. La radiación está presente en todas partes, sea cual sea el lugar en el que nos hallemos.

Los seres vivos conviven con las radiaciones desde sus orígenes. Sin la radiación del Sol no habría existido vida en la Tierra y sin la radiación infrarroja no podríamos calentarnos. Además de estas fuentes naturales de radiación, el ser humano ha sido capaz de desarrollar distintos aparatos que se basan o utilizan las radiaciones. Utilizamos la radiación cuando escuchamos la radio, hablamos por el móvil, calentamos el desayuno en el microondas, tostamos el pan o cuando nos hacen una radiografía para diagnosticar la rotura de un hueso.

¿Qué es la radiación?

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

*radiación***¿Qué es una onda electromagnética?**

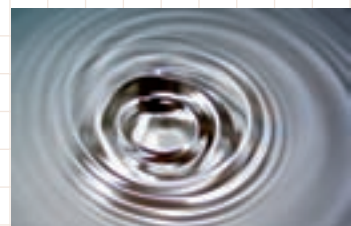
Vamos a empezar explicando lo que es una onda mecánica. Las ondas que se producen en un estanque al tirar una piedra son ondas mecánicas. El ritmo de llegada de las olas del mar a la orilla es la frecuencia. Podemos contar cuántas olas rompen en un minuto obteniendo de esta manera la *frecuencia*. La *longitud de onda* sería la distancia entre las crestas de dos olas sucesivas. Otro ejemplo de ondas mecánicas son las ondas sísmicas producidas por los terremotos. Estas ondas se transmiten a través de la corteza terrestre.

*frecuencia
longitud de onda*

Ahora que hemos visto el concepto de onda mecánica podemos trasladar los conceptos aprendidos a las *ondas electromagnéticas*. El principal problema a la hora de trasladar el modelo surge al pensar qué medio estamos alterando. En las ondas mecánicas del estanque se modificaba la posición de las partículas de agua y en los terremotos la corteza terrestre. Pero una de las principales características de las ondas electromagnéticas es que no necesitan un medio de propagación, es decir, se pueden transmitir incluso en el vacío. Una onda electromagnética es una forma de transportar energía y lo podemos observar si consideramos el hecho de que la luz calienta y que la llama azul es más calorífica que la llama roja.

ondas electromagnéticas

Cuanto mayor es la frecuencia de la radiación electromagnética, mayor será su energía. Las ondas o radiaciones electromagnéticas se pueden clasificar, según la frecuencia o la ener-



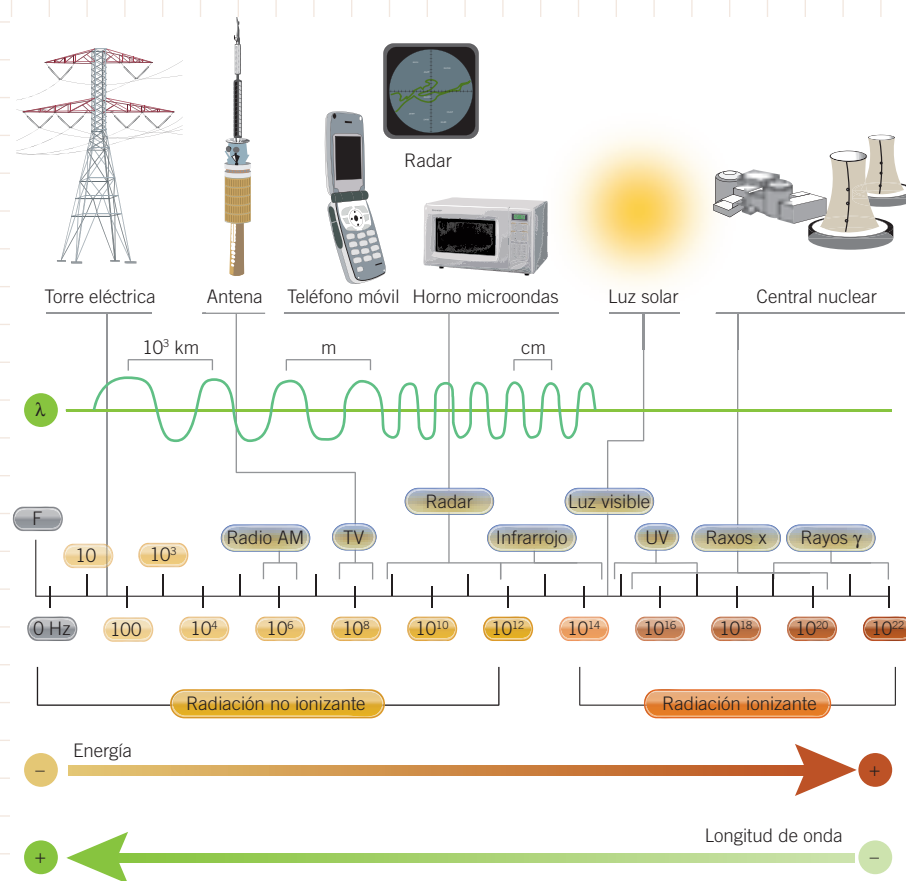
radiaciones ionizantes

gía que posean, en **radiaciones ionizantes** —tienen suficiente energía como para producir ionizaciones de los átomos del medio o materia que es irradiado y van desde los rayos x hasta la radiación cósmica— o **radiaciones no ionizantes** —no tienen la suficiente energía como para romper los enlaces atómicos del medio que es irradiado—.

radiaciones no ionizantes

espectro

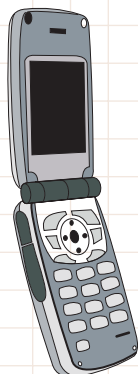
La radiación electromagnética se puede ordenar en un **espectro** que se extiende desde las ondas de frecuencias bajas (o longitudes de onda altas) hasta frecuencias elevadas (o longitudes de onda pequeñas). Según aumenta la frecuencia o disminuye la longitud de onda, el espectro electromagnético está compuesto por la transmisión de energía eléctrica, las ondas de radio, televisión y radar, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos x, la radiación gamma y los rayos cósmicos, entre otros.



El espectro de frecuencias

La radiación no ionizante

Dentro de las radiaciones no ionizantes producidas por el ser humano encontramos algunas con muchas aplicaciones en nuestra vida cotidiana. A continuación se describen las cuatro grandes regiones del espectro en las que se dividen estas radiaciones, comenzando por las menos energéticas:



- a) En el grupo de las *ondas de frecuencia menor que las ondas de radio* están las producidas por las redes de alta tensión, los electrodomésticos, los aparatos de resonancia magnética nuclear utilizados en medicina o las placas de cocina de inducción.

*ondas de frecuencia menor
que las ondas de radio*

- b) En la zona de la *radiofrecuencia*, se sitúan las ondas con las que se transmiten las señales de radar, de radio, de televisión o de los aparatos domésticos.

radiofrecuencia

Las ondas de radio son ondas electromagnéticas generadas artificialmente mediante un circuito oscilante. Tienen una amplia aplicación en las comunicaciones. Las ondas de radio de menor longitud de onda son usadas en la transmisión de señales de televisión, las de onda larga son usadas en las transmisiones radiofónicas. Las de longitud de onda media, que son menos reflejadas en la ionosfera (es una capa de la atmósfera) y recorren distancias más cortas, son utilizadas por el sistema de telefonía móvil. Para aumentar la cobertura, estas señales se envían a antenas repetidoras, que a su vez las reenvían a otras antenas.

Para determinar la dirección en que se encuentra el objeto se utilizan antenas parabólicas, que tienen la capacidad de recibir sólo 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) Las *microondas* corresponden a la parte del espectro electromagnético situada entre las ondas de radio y los infrarrojos (longitud de onda que va de 30 cm a 0,3 mm), por lo que su energía es baja. Las microondas interactúan con la materia, incrementando la velocidad de rotación de las moléculas.

microondas

Los hornos de microondas, comunes en muchos hogares, se utilizan para cocinar y calentar alimentos. Esto se logra al hacer vibrar las moléculas de agua que contienen, lo que hace que hierva y con ello caliente lo que rodea a estas moléculas. Así, por la acción de las microondas, las moléculas de agua vibran y, por la fricción que se genera entre ellas, calientan la materia en la que se encuentran.



- d) 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. Existen aplicaciones como el uso de fibras ópticas o simplemente la iluminación, que tienen una utilidad muy extendida. En este grupo se encuentra también la radiación infrarroja y la radiación ultravioleta.

*radiaciones ópticas
luz visible*

infrarroja

La radiación *infrarroja* aunque sea invisible podemos sentirla por el calor que nos transmite a la piel. Esta radiación de origen natural proviene del Sol.

La radiación infrarroja artificial se utiliza, por ejemplo, en el láser. Las aplicaciones son casi ilimitadas convirtiéndose en una herramienta muy valiosa y poderosa en la industria, la investigación científica, la tecnología militar y el arte. En medicina se utiliza en ciertos tipos de cirugías reemplazando al bisturí, ya que al mismo tiempo que corta cauteriza los pequeños vasos sanguíneos, evitando así las hemorragias. El infrarrojo también se utiliza para la calefacción industrial y doméstica y para el secado de barnices y pinturas, cueros, papeles y películas fotográficas, pastas alimenticias, deshidratación de frutas, verduras, etc. También es muy usada en alarmas y sistemas de control a distancia por infrarrojos.

ultravioleta

En la zona de la radiación *ultravioleta* se encuentra el 5% de la radiación de origen solar que penetra en la atmósfera y además puede usarse para la desinfección del agua en comunidades pequeñas o para tratamiento de enfermedades de la piel mediante las lámparas fluorescentes que emiten radiación ultravioleta (UVA).

ICNIRP

El mal uso de las radiaciones no ionizantes puede dar lugar a posibles efectos dañinos en el cuerpo humano, por lo que en 1992 se creó la Comisión Internacional de Protección Radiológica contra las Radiaciones no Ionizantes (*ICNIRP*), cuya principal función es asesorar e informar sobre los riesgos potenciales en la salud producidos por la exposición a este tipo de radiación y ha establecido 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

radiación ionizante natural

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.

radiación ionizante artificial

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 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.

ICRP

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. Escribe 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. Enumera alguna aplicación de la radiación ionizante en el campo de la medicina.

Verdadero o falso

Responde verdadero o falso y justifica 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. Los rayos UVA son un tipo de radiación ionizante.
4. Las radiaciones no ionizantes no producen efectos perjudiciales en el ser humano.

Actividades complementarias

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

FUENTES	RADIACIÓN IONIZANTE	RADIACIÓN NO IONIZANTE
Natural		
Artificial		

Radar, TV, radio, telefonía móvil.

Láser, alarmas.

Rayos cósmicos.

Horno microondas.

Centrales nucleares.

Aparatos para esterilización.

Radioterapia.

Isótopos radiactivos presentes en la corteza terrestre, en los alimentos y en el agua.

Medicina nuclear.

Rayos del Sol (luz visible, infrarrojos, rayos ultravioleta (UVA)).

Redes de alta tensión, aparatos eléctricos, placas de inducción, aparatos de resonancia magnética nuclear.

Detector de infrarrojos para las alarmas de seguridad.

Lámparas de bronceado.

Radiodiagnóstico (radiografías).

2. Dibuja el espectro electromagnético, colocando en los extremos: + energía, - energía. Debajo de cada tipo de radiación escribe una aplicación que utilice esa radiación y distingue las que son ionizantes de las no ionizantes.

Unidad 2

¿Qué es la radiación ionizante?

Objetivos

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Sabrá que toda materia se compone de átomos.
- Entenderá la estructura del átomo (núcleo con neutrones y protones, y corteza, con los electrones girando).
- Asociará la inestabilidad del átomo a su estructura.
- Sabrá que los átomos inestables emiten radiación ionizante.
- Identificará los tipos de radiaciones ionizantes y los clasificará en corpusculares y ondas electromagnéticas.
- Conocerá 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:

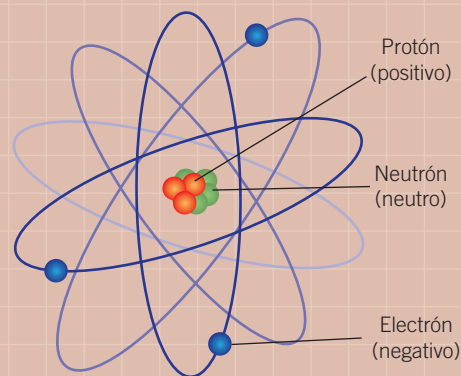
Sugerencias didácticas

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 (incluir científicos como Thomson, Rutherford, 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, los alumnos/as responden a las preguntas y realizan 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

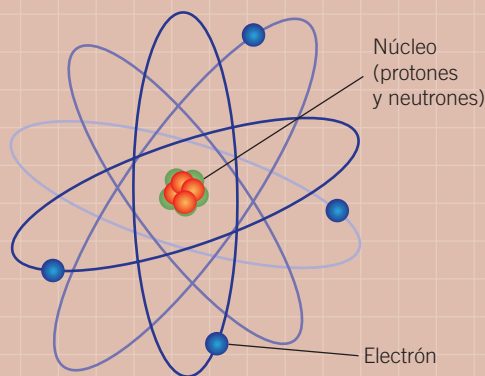
1. Citar dos científicos que se nombren en el texto y explicar qué descubrieron y en qué siglo vivieron.
John Dalton demostró en el siglo XIX la existencia de los átomos, y Becquerel (que vivió entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX) descubrió la radiactividad.
2. Dibujar un átomo de litio (tres electrones, tres protones y cuatro neutrones). ¿Cuál es su número másico? ¿Y su número atómico?



$$A = 7$$

$$Z = 3$$

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



$$A = 9$$

$$Z = 4$$

- ¿Qué es un elemento radiactivo?
Es un elemento cuyo núcleo es inestable. Debido a esta inestabilidad tiene tendencia a transformarse en otro elemento, emitiendo radiación ionizante.
- ¿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 encuentra en su camino.
- Describir los tipos de radiaciones ionizantes que existen.
Alfa (núcleos de helio 4: 2 protones + 2 neutrones).
Beta (emisión de electrones β^- o de positrones β^+).
Neutrones (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).
- Buscar información sobre los esposos Curie. ¿Qué relación tienen con Becquerel?
La relación que se puede destacar aquí es que los tres descubrieron y estudiaron elementos radiactivos: el uranio, Becquerel; y el polonio y el radio, los esposos 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).
- Buscar información sobre las aplicaciones de los rayos X y de los rayos gamma. ¿Es útil la radiación ionizante?

Definir los siguientes términos

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

Buscar en Internet

- Buscar la información necesaria para completar la siguiente tabla.

RADIACIÓN	PODER DE PENETRACIÓN / MATERIAL	PENETRACIÓN EN EL CUERPO HUMANO
α (alfa)	5 cm /aire	Capas exteriores de la piel
β (beta)	1 cm/aluminio	1 o 2 cm
γ (gamma)	Varios metros/hormigón	Atraviesa el cuerpo humano
Rayos X	Varios metros/hormigón	Atraviesa el cuerpo humano
Neutrones	Mayor poder de penetración que los rayos X	Atraviesa el cuerpo humano

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.

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.

átomos

En el siglo XIX John Dalton demostró la existencia de los átomos, entendiendo éstos 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.

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*.

electrones, protones
y neutrones

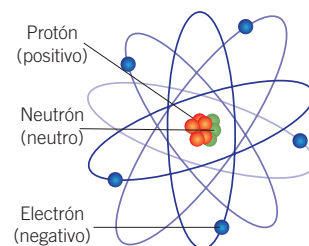
En cuanto a la estructura del átomo ha habido muchas teorías desde la Antigüedad. Con cada teoría se explicaba algún aspecto de la física pero no todos. Actualmente se acepta que el átomo tiene una estructura interna formada por un núcleo y una corteza o nube de electrones orbitando en torno al núcleo.

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.

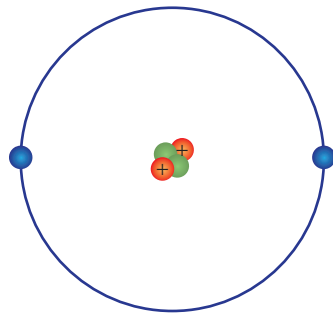
Como las cargas eléctricas iguales se repelen, igual que los polos magnéticos de igual signo de dos imanes, los protones tienen repulsión electromagnética, pero se mantienen unidos por la existencia de una fuerza más potente, denominada fuerza nuclear fuerte.

Prácticamente toda la masa del átomo se encuentra en el núcleo, ya que los electrones tienen una masa 1.835 veces menor que la del protón y el neutrón.

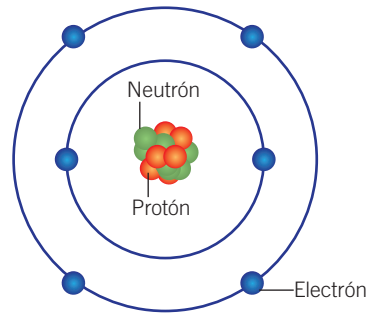
El núcleo más sencillo es el del hidrógeno, formado por un protón, el núcleo siguiente es el del helio. En la figura de la siguiente página vemos un átomo de helio. Tiene un núcleo formado por dos protones, dos neutrones y alrededor del núcleo giran dos electrones.



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



Átomo de helio



Átomo de carbono

número atómico
Z 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.

número másico
A 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.

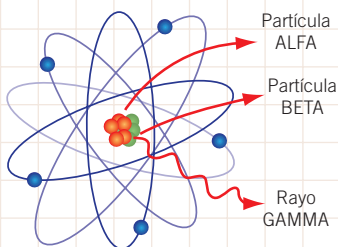
isótopos Existen átomos con igual número atómico pero distinto número másico, a los cuales se les conoce como *isótopos*. Por ejemplo, existen tres isótopos naturales del hidrógeno, el protio (^1H), el deuterio (^2H) y el tritio (^3H). Todos poseen las mismas propiedades químicas (las del hidrógeno) 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...

desintegraciones 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 *becquerelio*, 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.

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

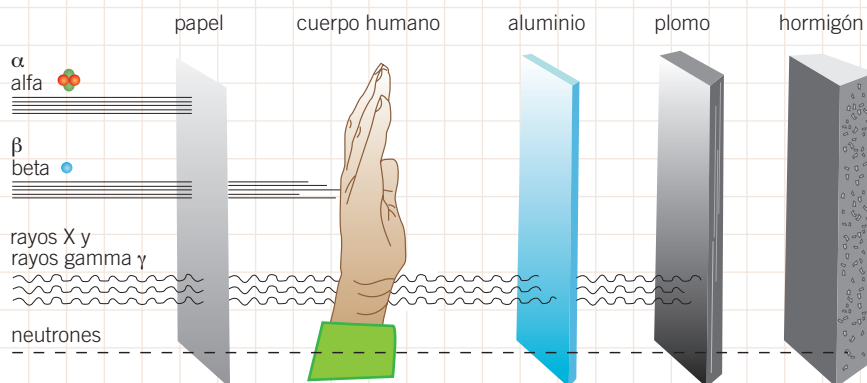
becquerelio



Los tipos de radiaciones ionizantes que existen son:

- 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. *alfa*
 - 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. *beta*
 - *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. *neutrones*
- Las que se presentan en forma de radiación electromagnética (sin carga ni masa):
 - *Rayos X*. *rayos X*
 - *Rayos gamma*. *rayos gamma*

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 sólo 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.



Puntos clave

Los núcleos atómicos inestables se desintegran y emiten radiación ionizante.

La unidad de actividad, igual a una desintegración por segundo, se llama, becquerelio.

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.*

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

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

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Sabrá que la radiación ionizante no se puede percibir por los sentidos.
- Comprenderá que para medir la radiación ionizante se utilizan instrumentos especiales.
- Podrá definir el concepto de actividad de una fuente radiactiva y conocerá su unidad.
- Podrá diferenciar entre “dosis absorbida” y “dosis equivalente”, 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 kilos, gramos; 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 becquerelios, 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 becquerelios.
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).

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 becquerelios, que es una unidad grande.
Falso. La actividad se mide en becquerelios pero es una unidad pequeña; por eso se emplean los kilobecquerelios.
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, oír-la 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. 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*.

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 interactuar con las radiaciones ionizantes. Algunos ejemplos son: gases que se convierten en conductores de electricidad, sustancias que emiten luz, etc.

En función de las características de los detectores, reciben diferentes nombres: cámara de ionización, contador proporcional, contador Geiger-Müller, contador de centelleo, dosímetro, etc.



Distintos instrumentos medidores de radiación



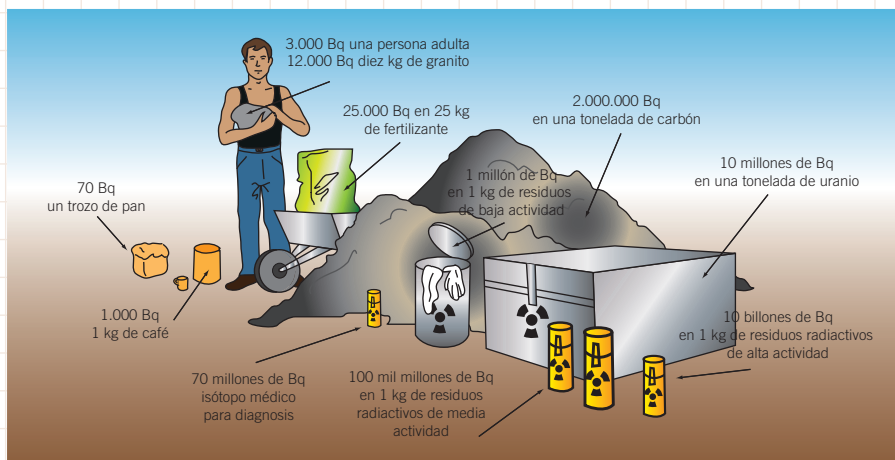
Dosímetro personal

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.

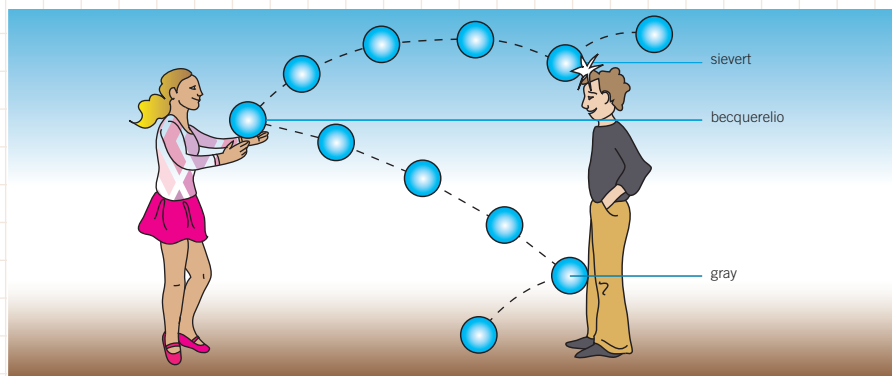
actividad La *actividad* de una fuente radiactiva nos proporciona una idea de lo intensa que es dicha fuente. A modo de ejemplo, podríamos comparar la actividad de una fuente radiactiva con el nivel de batería de una cámara de fotos, esto es, si la batería está llena podremos hacer muchas fotos, mientras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

medir becquerelios La actividad de las fuentes radiactivas se *mide* en unas unidades que se denominan *becquerelios*, en honor del científico Henry Becquerel, descubridor de la radiactividad. Sin embargo, el becquerelio (Bq) es una unidad muy pequeña y por eso, se suele hablar de kilobecquerelios (kBq), ya que utilizar el becquerelio sería como medir longitudes o distancias en micras.

Como se puede ver en la imagen, en un simple trozo de pan se pueden detectar 70 Bq de radiactividad, y en un kilo de café, 1.000 Bq.



dosís Para predecir de forma aproximada los posibles efectos que pueden producir las radiaciones en el organismo, se utiliza el concepto de *dosís*. Para entender estas características, vamos a proponer a modo de ejemplo un juego.



Representación simplificada de la relación entre las tres unidades que miden la radiactividad y las dosis de radiación ionizante (becquerelio, 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 contra 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 contra 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.

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.

*dosis absorbida
grays (Gy)*

La dosis absorbida es insuficiente para expresar el efecto biológico que produce la radiación, ya que éste depende de las características de la radiación y del tejido expuesto a la misma. 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 ésta.

*dosis equivalente
sievert (Sv)*

La *dosis efectiva* (E) es la suma ponderada de la 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.

dosis efectiva

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 $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$. 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 becquerelios. 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 becquerelios, 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 ionizante?****Objetivos**

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Diferenciará la radiación no ionizante (infrarrojos, visible, rayos ultravioletas) y la radiación ionizante.
- Identificará los distintos tipos de radiaciones ionizantes (rayos alfa, beta, gamma y rayos X).
- Conocerá el origen, la energía y el poder de penetración asociados a cada uno de los tipos de radiaciones ionizantes.
- Identificará las medidas básicas de protección contra la radiación ionizante.
- Comprenderá los efectos biológicos asociados a la exposición 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: 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 a los alumnos/as qué tipos de radiaciones conocen y qué efectos producen, diferenciando las radiaciones ionizantes de las no ionizantes. Después los alumnos/as 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 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 radiación ionizante a la que está expuesto el cuerpo humano (alfa, beta, gamma, rayos X, neutrones) y de que la fuente de radiación se encuentre dentro del cuerpo humano, o sea externa a él.

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?

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 sólo 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, éstas 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.

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

Entre los órganos más sensibles a la radiación ionizante están los ovarios, testículos, cristalino y médula ósea.

Verdadero o falso

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

1. Los rayos UVA son un tipo de radiación ionizante.
Falso. Son radiaciones no ionizantes.
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

y de 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
- Rayos UVA
- Rayos gamma
- Rayos X

Unidad 4

¿Cómo afecta a nuestro cuerpo la radiación ionizante?

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. Sentimos los rayos del Sol que llegan a la Tierra porque nos calientan y además, gracias a ellos, podemos ver los objetos. Sin embargo, hay otros rayos procedentes del Sol 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 produce cambios permanentes en el tejido de la piel y puede causar 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, y especialmente a los niños, ya que en los primeros años de vida el efecto perjudicial de la luz solar alcanza sus cotas máximas.

Por fortuna, la atmósfera, especialmente la capa de ozono, absorbe la mayor parte de los rayos UVA, 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. Por cierto, la radiación ultravioleta no es un tipo de radiación ionizante. Es demasiado débil para que afecte a los electrones de los átomos.

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

Las *radiaciones ionizantes*, en función de su energía, pueden producir en la materia que atraviesan un gran número de transformaciones químicas y físicas. El daño que la radiación ionizante puede producir en el cuerpo humano depende de factores como:

radiaciones ionizantes

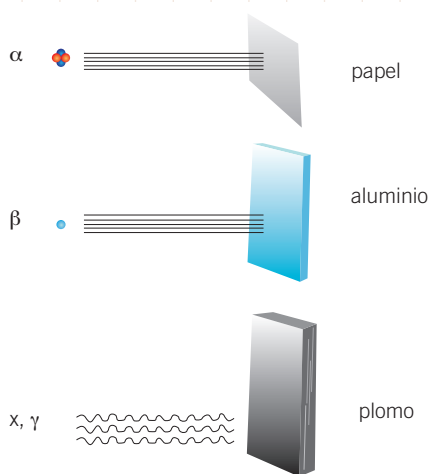
- El tipo de radiación ionizante a la que está expuesto el cuerpo humano: alfa, beta, gamma, rayos X, neutrones.
- Posición de la fuente de radiación: dentro del cuerpo humano o externa a él.

radiación alfa *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 *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 penetran hasta 1 o 2 cm y se detienen con una lámina de aluminio. Los isótopos que emiten radiación beta y están situados en el exterior del cuerpo humano pueden ser perjudiciales para el tejido superficial (la piel) cuando dichos isótopos penetran en el interior del organismo, pueden dañar diferentes órganos.

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

rayos X *Los rayos X* son de la misma naturaleza que los rayos gamma, pero se originan en la zona de la corteza de los átomos.



medidas básicas de protección Como *medidas básicas de protección* contra la radiación ionizante están:

- La distancia: alejarse todo lo posible de la fuente de radiación.
- El tiempo de exposición: permanecer el menor tiempo posible cerca de la fuente de radiación.
- Uso de barreras de protección o blindajes: interponer entre la fuente de radiación y las personas una barrera que detenga o disminuya 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, siendo la *Radiobiología* la ciencia que estudia los sucesos que se producen después de la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes, los esfuerzos del organismo para compensar los efectos de esa absorción y las lesiones y reparaciones que se pueden producir en el organismo.

radiobiología

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:

- *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 sólo 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 deterministas podemos destacar, entre otros, las quemaduras y las cataratas.
- *Efectos estocásticos*: Si debido a la exposición a radiaciones ionizantes, se producen transformaciones celulares, éstas 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.

*efectos deterministas**efectos estocásticos***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: deterministas 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 alumno/a:

- Conocerá las aplicaciones médicas de la radiación ionizante.
- Diferenciará las técnicas que utilizan fuentes de radiación externas (radiodiagnóstico) y las técnicas basadas en fuentes de radiación internas (medicina nuclear).
- Conocerá en qué consiste la radioterapia y cómo se utiliza en el tratamiento contra el cáncer.
- Comprenderá la importancia de evaluar 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 puede consultarse el capítulo 5 del Suplemento Técnico (Efectos biológicos de la radiación: aspectos legales).

Sugerencias didácticas

Esta unidad se puede introducir contando la historia del enfrentamiento, en 1911, de George de Hevesy (Premio Nobel de Química) con su patrona. 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 alumnos/as. 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 concep-

tos 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 aplicando una tensión determinada en un tubo de vacío. 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 fijan en un tejido, órgano o sistema determinado. Posteriormente, se sitúa al paciente ante un equipo, llamado gammacámara, para obtener la imagen diagnóstica 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. Se utiliza en medicina nuclear.
3. ¿Qué es la radioterapia?
Es la aplicación de radiación ionizante para destruir las células cancerosas.
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 (rayos X), en medicina nuclear la fuente es interna (se introduce en el cuerpo del paciente) y en radioterapia la fuente puede ser externa (rayos X) o interna (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 posi-

ble; se deben llevar a cabo siempre bajo la responsabilidad de un especialista médico y, cuando sea posible, se deben utilizar protectores plomados para proteger los órganos adyacentes.

Debate

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

Buscar en Internet

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

(Si se tiene acceso a Internet durante la clase se puede mostrar alguna imagen de las radiografías que Röntgen hacía de la mano de su mujer, con el anillo de boda).

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 unos 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 (abiertas).

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.

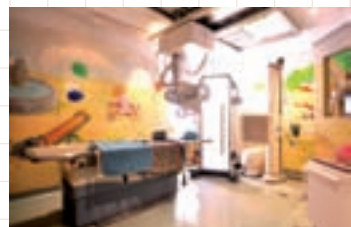
Se conoce con el nombre de radiodiagnóstico el conjunto de procedimientos de exploración y visualización de las estructuras anatómicas del interior del cuerpo humano mediante la utilización de los rayos X. Ocupa un lugar preponderante entre las técnicas de imagen debido al gran número de instalaciones, 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 (kV). 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 represente al hueso, ya que los pulmones fundamentalmente tienen aire y éste 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 radiográficos. Las pruebas de radiología convencional son las exploraciones más solicitadas, ocupan el primer lugar los estudios radiográficos de tórax, seguidos por los de columna.

Otra técnica también basada en la aplicación con rayos X es la tomografía computarizada (TC). Pese a los riesgos relacionados con la radiación, 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.



Sala digital de rayos X infantil



Radiografía de torax



TC

Medicina Nuclear

radiofármaco

En Medicina Nuclear se usan los isótopos radiactivos (radioisótopo) con fines de diagnóstico y también para tratamiento de diversas enfermedades. La Medicina Nuclear permite la obtención de imágenes diagnósticas utilizando radioisótopos que se presentan como fuentes no encapsuladas (abiertas). El *radiofármaco* es la asociación de un fármaco que transporta el isótopo radiactivo al lugar de interés para estudiar o tratar.

diagnóstico

- Técnicas de *diagnóstico*: se basan en isótopos radiactivos denominados trazadores (radio-trazadores). Se llaman radiotrazadores porque se administran en dosis muy pequeñas, no tienen ninguna acción fármaco-terapéutica, ni efectos secundarios, ni reacciones adversas graves. Son sustancias que, introducidas en el organismo, permiten su seguimiento desde el exterior. El trazador se fija en un tejido, órgano o sistema determinado. Como trazador, se utiliza generalmente el tecnecio-99m que se administra al paciente por vía intravenosa. Posteriormente, se sitúa al paciente ante un equipo, llamado gammacámara, para obtener la imagen diagnóstica 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. Mediante la utilización de la gammacámara se obtienen imágenes del órgano estudiado, que no son únicamente morfológicas, sino funcionales y morfo-funcionales.

tratamiento

- Técnicas de *tratamiento*: desde el punto de vista terapéutico, la Medicina Nuclear tiene sus principales aplicaciones en el cáncer de tiroides, el hipertiroidismo y el tratamiento del dolor óseo. El radioisótopo más usado es el yodo-131 (I-131) aunque también se utiliza el samario-153 (Sm-153).

Radioterapia

En radioterapia, la radiación ionizante se utiliza para destruir lesiones cancerosas sin riesgos indebidos para el paciente. Para ello, se expone el tumor a dosis procedentes de fuentes de radiactividad externas en unos casos o internas, en otros.

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 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 hasta con 250.000 voltios. Para un voltaje más elevado debe utilizarse un acelerador lineal de electrones que aumenta la energía por etapas y puede alcanzar hasta 20 millones de voltios.
- Radioterapia con fuente de cobalto-60: utiliza cobalto-60 en fuentes selladas muy compactas, de aproximadamente 1 centímetro de anchura, con actividad suficiente para proporcionar dosis muy altas al tumor. Actualmente se está dejando de usar.

- Braquiterapia: utiliza isótopos radiactivos que pueden introducirse dentro del cuerpo del paciente y que destruyen las células cancerosas. Se usan el cesio-137 (Cs-137), el iridio-192 (Ir-192) o el yodo 125 (I-125) entre otros.
- Radioterapia metabólica: como ya hemos comentado, algunos radioisótopos en forma de fuente no encapsulada (abierta) pueden introducirse en el interior del cuerpo del paciente y el tratamiento dependerá de la afinidad de ciertos órganos con determinadas sustancias y su capacidad para concentrarla. Por ejemplo, la glándula tiroides es selectiva con el yodo, de forma que los tumores de la glándula tiroides se pueden tratar con un isótopo radiactivo como el yodo-131. También se utilizan otros como el samario-153 para el tratamiento de los dolores óseos.

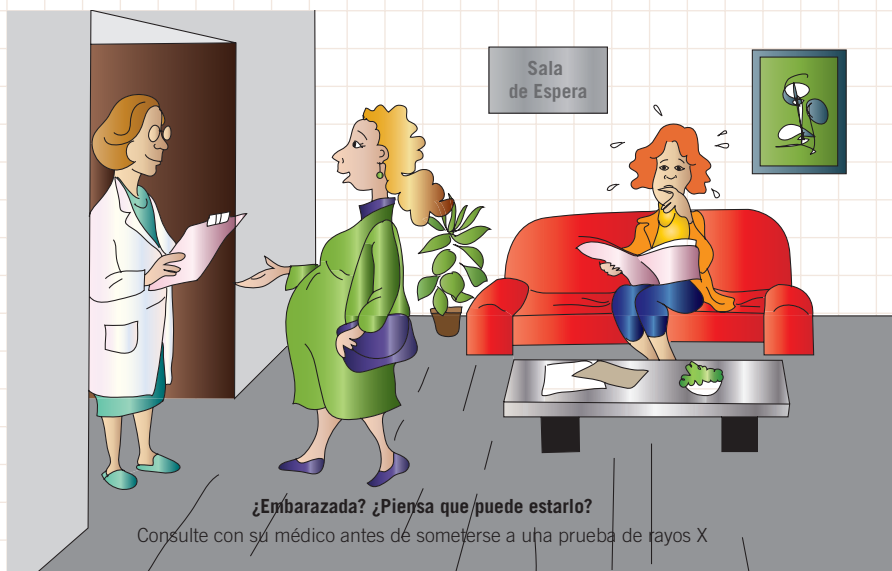


Equipo de braquiterapia

En todo caso, y en relación con la *protección radiológica del paciente*, es importante mencionar que la exposición de los pacientes a la radiación ionizante por causas médicas, proporcionan un gran beneficio diagnóstico o terapéutico frente al posible daño que puedan causar. Por ello, es imprescindible que estas exposiciones:

protección radiológica del paciente

- Estén siempre *justificadas*. La exposición que no pueda justificarse deberá prohibirse.
- Se realicen con la mínima dosis posible. Los procedimientos diagnósticos deben estar siempre *optimizados* a fin de obtener una imagen diagnóstica adecuada con la menor dosis posible. En el caso de los tratamientos, se deberá suministrar la dosis prescrita en el órgano a tratar procurando irradiar lo menos posible a los órganos sanos. En cualquier caso deben realizarse a partir de protocolos establecidos que garanticen su calidad.
- Se lleven a cabo siempre bajo la responsabilidad de un *especialista médico*.
- Siempre que sea posible, se deben utilizar *protectores* plomados para proteger los órganos adyacentes (especialmente gónadas, tiroides).
- Especial atención merecen los niños, por tener una mayor sensibilidad a la radiación, así como las mujeres embarazadas para la protección del feto y las mujeres lactantes.



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 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 alumno/a:

- Comprenderá que la capacidad de la radiación de atravesar la materia sirve para numerosas aplicaciones.
- Sabrá 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.
- Se concienciará de la importancia que las radiaciones ionizantes tienen en investigación.
- Podrá evaluar 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 scanner de rayos X).

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 que es 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 capacidad que tienen las radiaciones para atravesar los objetos y materiales 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.
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? Si. El daño que la radiación ionizante puede producir en el cuerpo humano.

Buscar 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 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.
- *Medida del grado de humedad*, 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, etc.

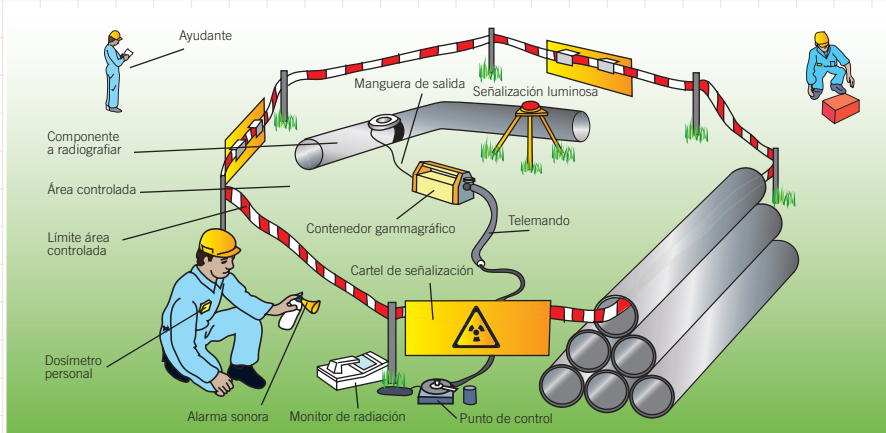


Equipo de control de proceso para medida de nivel de llenado



Medidor del grado de humedad

- **Gammagrafía o radiografía industrial.** Usada, por ejemplo, para verificar las uniones de soldadura en tuberías.



- **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.



- **Detectores de humo,** instalados dentro de las redes de vigilancia contra incendios. Su diseño incorpora una cámara de ionización, una fuente radiactiva (Am-241 , $<37 \text{ KBq}$) 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.
- **Esterilización de materiales.** Técnica que utiliza la radiación ionizante por su acción bactericida. Muy utilizado en la industria farmacéutica y alimentaria.
- **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 del 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.

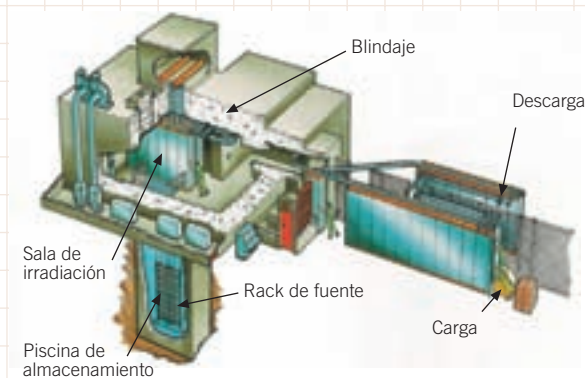


- *Detección de fugas.* Introduciendo en las canalizaciones, isótopos radiactivos como *trazadores*.
- *Técnicas analíticas.* Para determinar la *composición o estructura de la materia* que se analiza.

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*.



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 del cáncer, patologías moleculares, evolución genética, terapia genética, desarrollo de fármacos, etc.

- En general la investigación emplea los *isótopos radiactivos no encapsulados* ensayando en laboratorio, a pequeña escala, el comportamiento de un proceso o actividad que posteriormente podrá aplicarse a gran escala.
- También se emplean *técnicas analíticas* para investigar la estructura cristalina de distintos compuestos o para identificar componentes en muestras.

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.

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: biología, desarrollo de fármacos, etc. Así como técnicas analíticas para investigar la estructura cristalina de distintos compuestos o para identificar componentes en muestras.

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?*

Buscar 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 alumno/a:

- Comprenderá los conceptos de fisión y fusión.
- Podrá describir el funcionamiento general de una central nuclear y conocerá sus partes fundamentales, asociándolas a la función que realizan.
- Sabrá que existen dos tipos de centrales nucleares (central de agua en ebullición y de agua a presión).
- Podrá situar geográficamente alguna de las centrales nucleares que existen en España.
- Comprenderá el proceso de fusión que ocurre en las estrellas.
- Conocerá el proyecto ITER.
- Conocerá 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 <http://www.iter.org/> 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 esquema eliminando los nombres 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/respuestas y tareas

1. Explicar cómo funciona un reactor nuclear de fisión.
Reacción en cadena, núcleo de uranio 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 seis centrales nucleares en operación con un total de ocho reactores: Almaraz (dos reactores), Ascó (dos reactores), Cofrentes, Garoña, Trillo y Vandellós II. Garoña y Cofrentes son 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?
Porque el *Nautilus* no dependía de una fuente exterior de combustible ni necesitaba oxígeno para la combustión. Por lo tanto, pudo mantenerse bajo el agua durante un tiempo muy largo.
4. Buscar información sobre el proyecto ITER.
5. Investigar quiénes son los cinco países que pueden tener armamento nuclear y han firmado el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares.
En el tratado, sólo se 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).

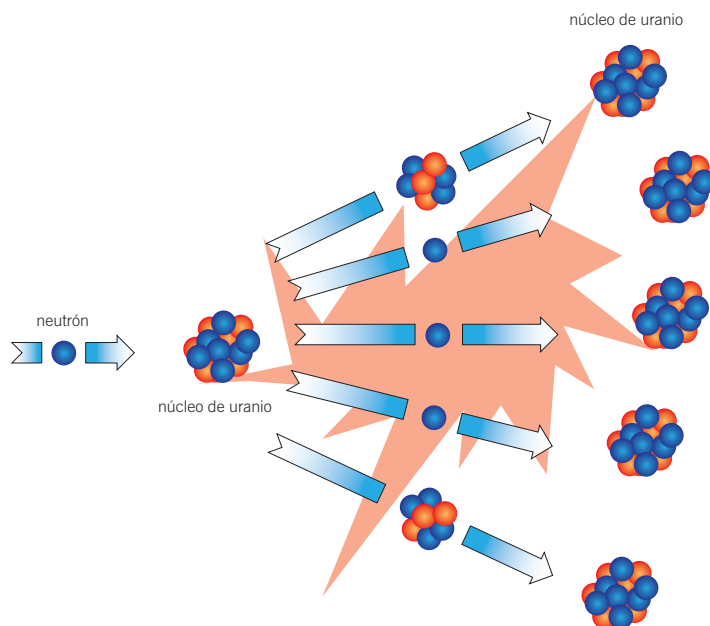
Unidad 7

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.



Reacción en cadena

combustible

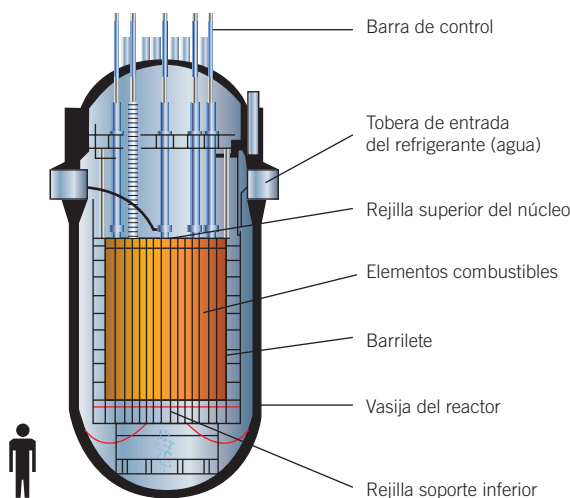
El material utilizado como *combustible* está formado por átomos fisibles (que se pueden dividir), pudiendo ser uranio natural, uranio tratado para que tenga mayor contenido en el isótopo uranio-235 (llamado uranio enriquecido), torio o uranio mezclado con plutonio. El combustible más utilizado es el 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*.

reacción nuclear en cadena

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.

**vasija del reactor
moderador**

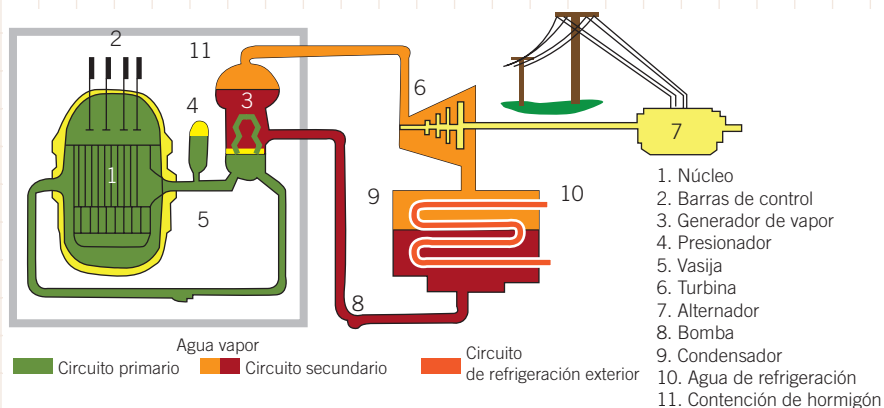
barras de control



Esquema de un reactor nuclear PWR

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.



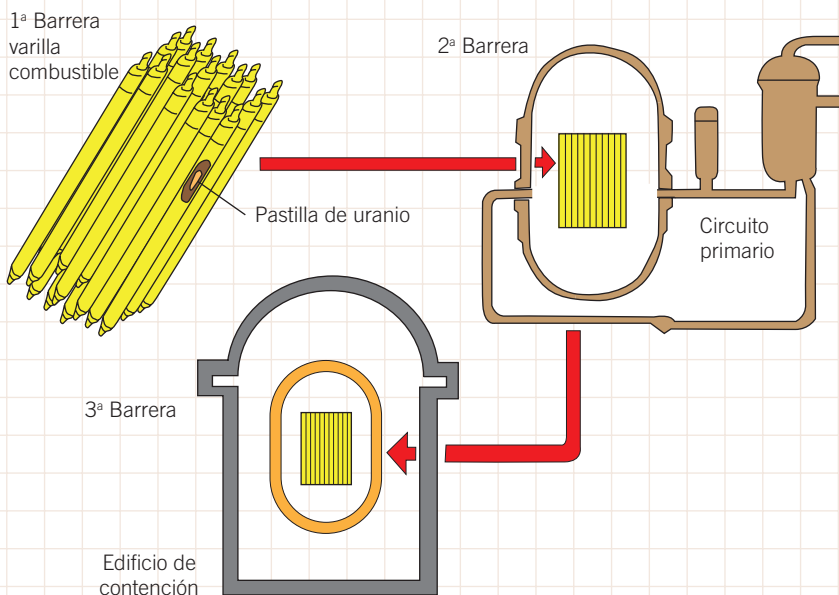
Esquema de una central de agua a presión

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.

barreras de seguridad

En principio se pueden considerar las siguientes:

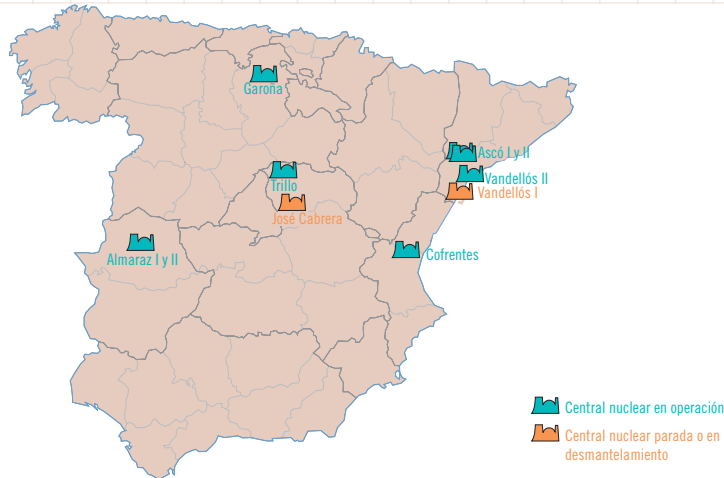
- La vaina que envuelve las pastillas de combustible.
- El circuito primario (o barrera de presión).
- La contención.



Tipos de centrales nucleares operativas en España

PWR, BWR

Actualmente en nuestro país existen dos tipos de centrales nucleares en operación: las 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.



Ocho reactores nucleares en funcionamiento, situados en seis emplazamientos

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.

La fusión nuclear

La fusión nuclear ocurre cuando dos núcleos atómicos muy ligeros se unen y forman un núcleo atómico más pesado, con mayor estabilidad, y se libera gran cantidad de energía. Ésta es la energía que se produce en general en todas las estrellas. 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.

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

unión de los núcleos

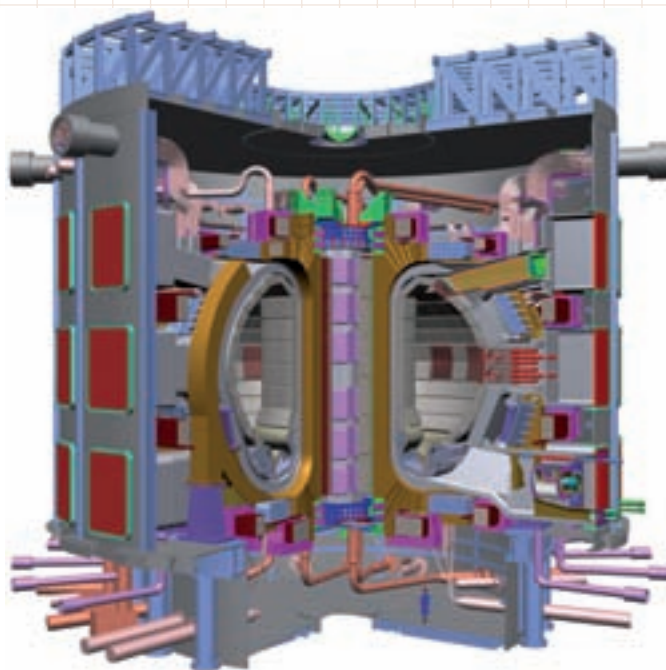
plasma

Un ejemplo de fusión nuclear se puede representar por el siguiente esquema y relación de equilibrio: ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \longrightarrow {}^3\text{He} + {}^1_0\text{n} + \text{Energía}$

La construcción del primer reactor nuclear experimental de fusión conocido como *ITER* ya se ha iniciado en Cadarache (Francia) y las obras deberían concluir en 2018. El diseño de este reactor es ruso y se llama *tokamak*. 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.

ITER

tokamak



Las bombas nucleares de hidrógeno (conocidas como bombas H) se basan en este tipo de reacciones. Al ser una reacción más energética que la de fisión, su poder destructivo es muy superior.

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.

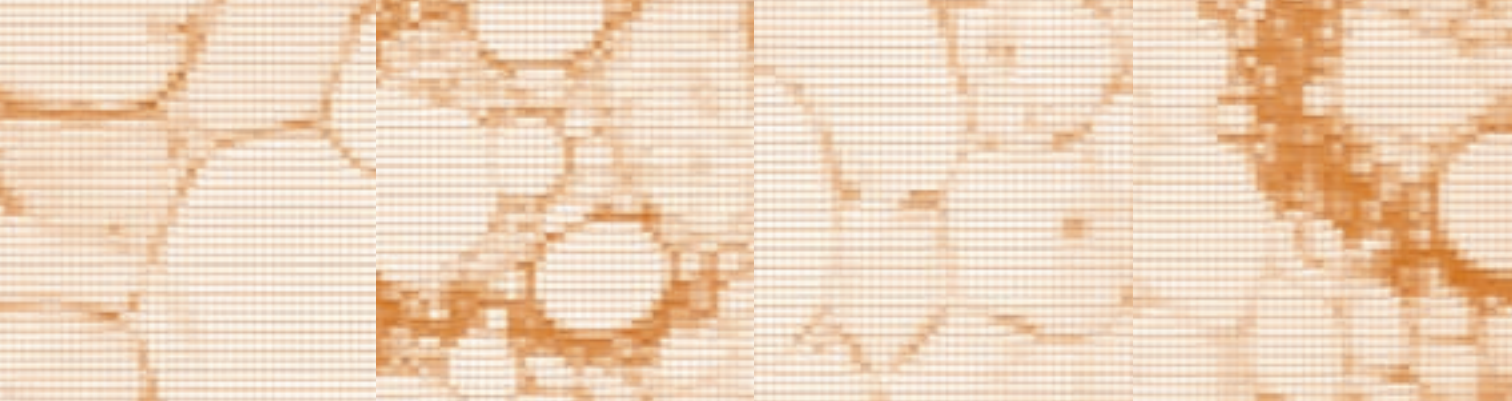
Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares

Puntos clave

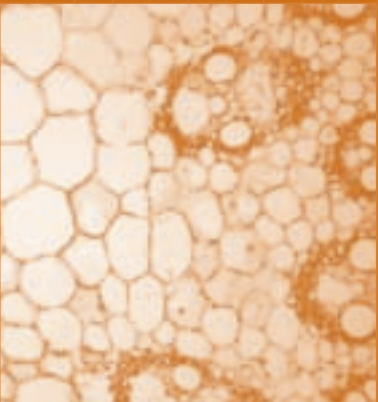
Los reactores nucleares tienen otras aplicaciones, aparte de la generación de electricidad para el consumo general. Se emplean, por ejemplo, para propulsar buques (incluidos submarinos). La aplicación de la fusión nuclear para la obtención de electricidad se encuentra todavía en fase de desarrollo (ITER).

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.*

A horizontal strip at the top of the page showing a microscopic view of plant tissue, likely a cross-section of a stem, with various cell structures visible in shades of orange and brown.

nivel II

A rectangular inset image in the lower right quadrant showing a microscopic view of plant tissue, similar to the top strip, with cell structures visible in shades of orange and brown.A horizontal bar at the bottom of the page consisting of four colored segments: green, dark red, orange, and yellow.

nivel II

alumnado de 16 a 18 años

- 68 | **Unidad 1**
Radiación ionizante en la vida diaria
- 78 | **Unidad 2**
La radiación ionizante y sus efectos biológicos
- 84 | **Unidad 3**
Protección contra la radiación ionizante
- 92 | **Unidad 4**
Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes
- 102 | **Unidad 5**
Otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes
- 110 | **Unidad 6**
Obtención de energía de origen nuclear
- 122 | **Unidad 7**
Los residuos radiactivos

nivel II

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

Información

En este nivel reaparecen diferentes aspectos abordados en el nivel I pero tratados con mayor profundidad, incluyéndose 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 guión al profesor/a para explicar a los alumnos/as diferentes aspectos relacionados con las radiaciones: 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 titulado “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 los alumnos/as deben:

- Conocer las principales fuentes de radiación ionizante de origen natural: 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.
- Conocer los principios básicos de la protección radiológica y las medidas de protección radiológica apropiadas e función del tipo de riesgo radiológico.
- Conocer aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo médico para diagnóstico y terapia.
- Conocer 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.
- Conocer que Enresa es la empresa encargada de la gestión de los residuos radiactivos y que el CSN se ocupa de controlar la seguridad de esa gestión.

nivel II

Unidad 1

Radiación ionizante en la vida diaria

Objetivos

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Sabrá que la mayor parte de la radiación que recibimos (80%) es de origen natural.
- Podrá nombrar las principales fuentes naturales de radiación ionizante, clasificándolas en internas o externas.
- Valorará el efecto protector de la atmósfera (radiación cósmica).
- Conocerá las formas de disminuir la dosis de radiación ionizante procedente del radón y asociará este elemento como una de las principales fuentes de radiación ionizante natural.
- Conocerá el origen y las aplicaciones de la radiación ionizante de origen artificial.
- Podrá analizar 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: 3 Espectro de ondas electromagnéticas: radiación ionizante y no ionizante, 4 Radiactividad y radiaciones ionizantes y 9 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 alumnos/as 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). Después los alumnos leen 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, los alumnos/as responden a las preguntas propuestas.

Preguntas y tareas

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 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 1/1.000 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.

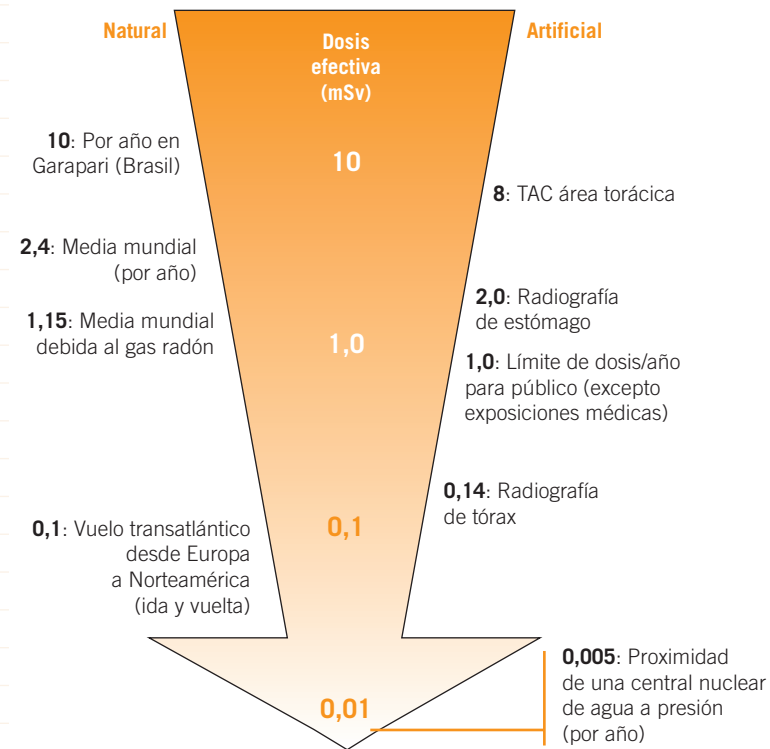
Las radiaciones ionizantes que nos rodean en nuestra vida diaria se pueden clasificar atendiendo a su origen como naturales o artificiales.

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.



Radiación en la vida diaria (Fuente: UNSCEAR)

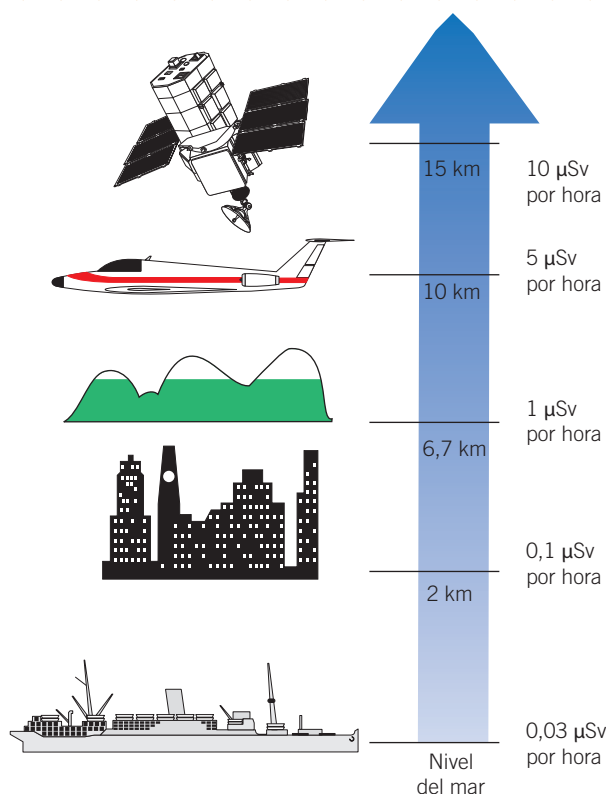
La dosis anual se suele expresar en milisievert por año (mSv/año). La unidad de actividad es el becquerelio (símbolo Bq) y utilizaremos Bq por metro cúbico y Bq por kilogramo para expresar la concentración de isótopos radiactivos en los materiales.

El cuadro que se encuentra al final de esta unidad es un resumen de las dosis anuales que recibimos de radiación ionizante natural y artificial.

Radiación ionizante natural

Radiación cósmica

Las tasas de dosis de radiación cósmica aumentan con la altitud, porque perdemos el efecto protector de la atmósfera terrestre. Los pasajeros y la tripulación de un avión recibirán una dosis de 0,03 mSv durante un vuelo de 5.000 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 1.000 metros de altitud.



Valores anuales de radiación cósmica a diferentes altitudes

También influye, aunque en menor medida, la latitud, 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 de tasa de dosis de radiación cósmica que una persona que viva en Grecia.

Radiación en la Tierra

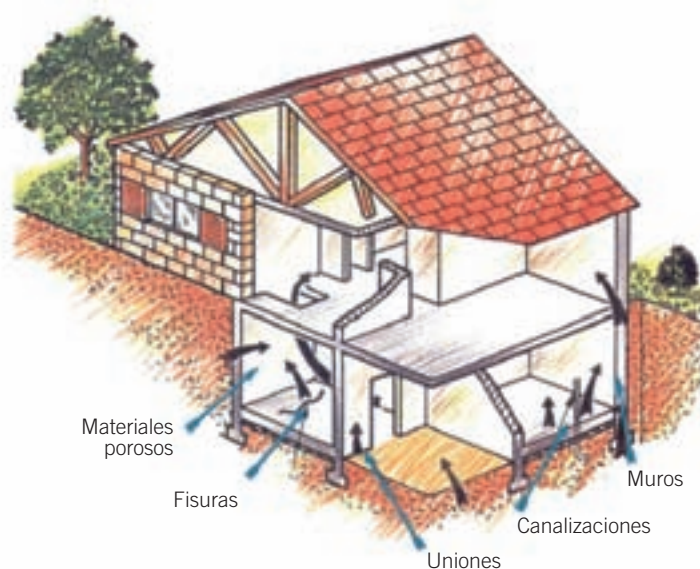
Los principales elementos radiactivos presentes en las rocas que constituyen la corteza terrestre son el potasio 40 y las dos series de elementos radiactivos naturales procedentes de la desintegración del uranio 238 y del torio 232. También existe el rubidio 87 y el uranio 235 pero revisten menor importancia.

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.

Radón

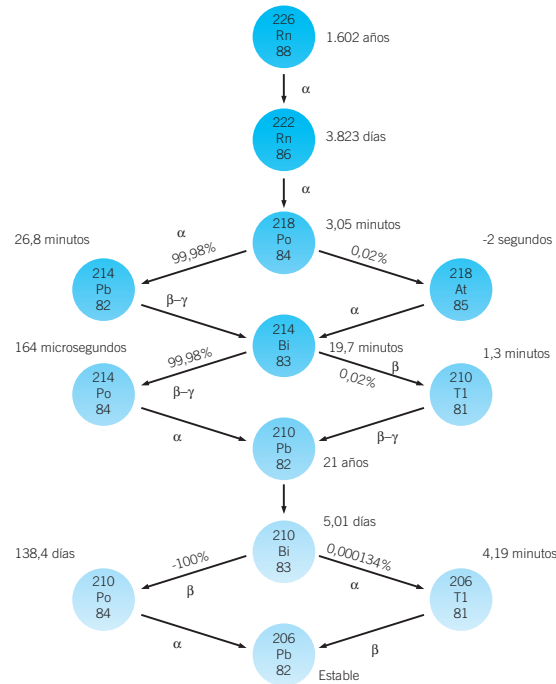
El gas radiactivo radón-222 junto con los elementos de su serie radiactiva (descendientes) son los causantes de la mayor parte de la dosis que recibimos de origen natural. La presencia de radón en el aire de las casas tiene diferentes orígenes: el suelo situado bajo la casa, los materiales de construcción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

La concentración de radón en el aire interior es variable, llegándose a medir valores superiores a 5.000 Bq/m^3 en algunas zonas de España.



Principales vías de entrada de radón en una casa

El gas radón-222 se desintegra dando lugar a isótopos radiactivos de vida media corta emisores de radiación alfa, beta, o beta/gamma.



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.



Esta ilustración presenta diferentes opciones de mitigación. El sistema de mitigación más común usualmente tiene sólo una tubería que penetra el piso del sótano, esta tubería también puede ser instalada en la parte exterior de la casa.

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 ilustración de la página anterior) 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 $\mu\text{Sv/año}$. Ésta es una exposición interna de radiación ionizante natural a la que no podemos escapar, porque el potasio es un elemento esencial y sólo 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: aparatos de rayos X para diagnóstico en medicina, para el control de soldaduras o para el control de seguridad en aeropuertos y edificios públicos, 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, azafrán, etc.), 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 período 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.

El cuadro 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.

Fuente o tipo de exposición	Dosis media anual mundial	Intervalo típico de las dosis individuales	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.
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 miliSievert (mSv).

Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante por fuente (miliSievert)

Fuente o tipo de exposición	Dosis media anual mundial	Intervalo típico de las dosis individuales	Observaciones
Fuentes de exposición artificiales			
Diagnóstico médico (excluida la terapia)	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 atmósfera	0,005	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	0,005	~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).
Accidente de Chernobyl	0,002	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 del combustible nuclear (exposición de la población)	0,0002	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.

Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante por fuente (miliSievert)

Cuando se calcula la dosis de radiación recibida por las personas que trabajan con radiaciones ionizantes, la media sobre la totalidad de la población resulta muy pequeña, dado que los trabajadores expuestos (que son los que trabajan con radiaciones ionizantes) constituyen una proporción reducida de la población y su dosis está estrictamente controlada.

De estos datos se deduce que la fuente de radiación más importante de exposición es el radón, ya que contribuye en, aproximadamente, el 50% de la radiación natural y, además es la principal fuente de exposición si consideramos también las fuentes artificiales.

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 las mismas. 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 alumno/a:

- Asociará cada tipo de radiación ionizante con su poder de penetración.
- Comprenderá los efectos que la radiación ionizante produce en el átomo y las moléculas.
- Reconocerá los efectos biológicos que la radiación ionizante produce en los organismos vivos.
- Identificará los efectos deterministas y estocásticos de la radiación ionizante.
- Reconocerá 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: 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. Los efectos biológicos pueden ser: según cómo se manifiesten, somáticos o hereditarios; y según el daño que producen, deterministas o estocásticos. Para terminar el tema se recogen los efectos biológicos

que la radiación ionizante produce en un caso particular: una mujer embarazada.

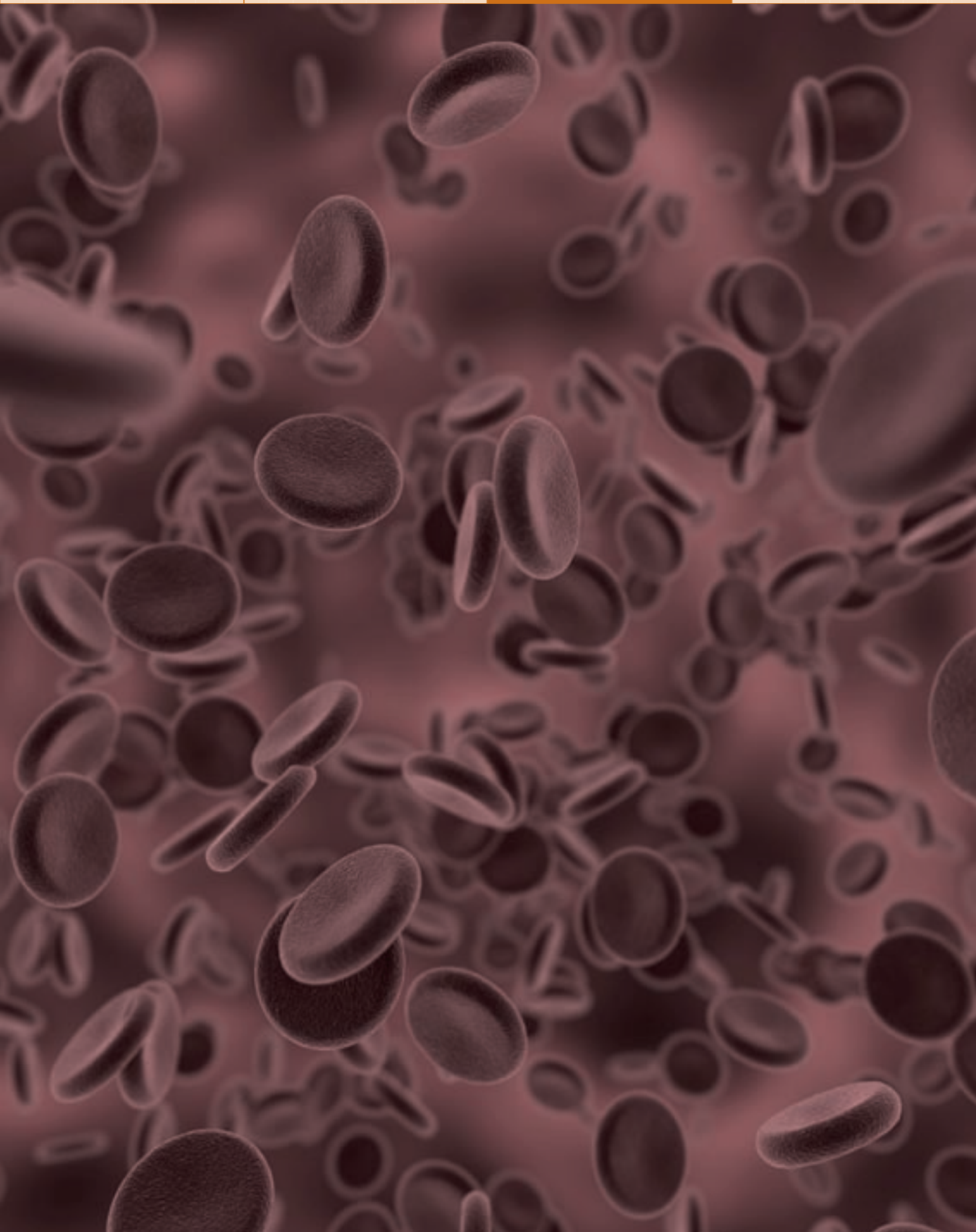
Los alumnos/as leen el tema y responden las preguntas y actividades propuestas.

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:

Radiación	Poder de penetración / material	Penetración en el cuerpo humano
α (alfa)		
β (beta)		
γ (gamma)		
Rayos X		

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?
10. ¿Qué es el efecto hereditario? ¿Por qué se origina?
11. ¿Qué es un efecto determinista? Escribir tres efectos deterministas de la radiación ionizante en el feto.
12. ¿Qué es un efecto estocástico? Citar un ejemplo.



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 gamma choca con otro átomo, lo más probable es que reaccione con la órbita exterior de los electrones. Si se expulsa un electrón, el átomo perderá una carga negativa y pasará a cargarse 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.

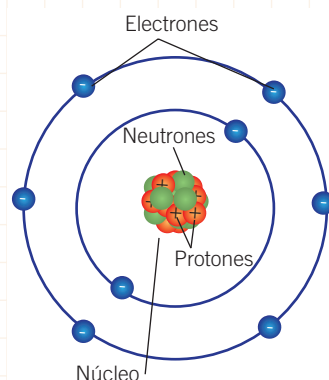
Sabemos que la radiación ionizante es penetrante y, en algunos casos, puede pasar a través de objetos sólidos como el metal. A continuación se dan las distancias típicas de penetración:

- Partícula alfa: hasta 5 centímetros de aire. Produce una ionización muy intensa.
- Partícula beta: hasta 1 centímetro de aluminio.
- Radiación gamma: hasta varios metros de hormigón, o varios centímetros de plomo.
- Radiación X: semejante a la gamma.

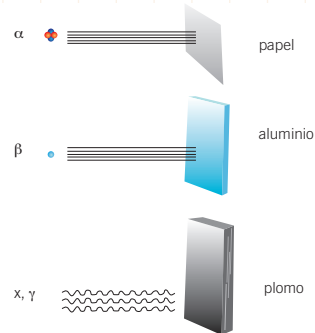
Para detener la radiación alfa es suficiente una lámina de papel. Cuando el isótopo emisor de radiación alfa se encuentra en el exterior del cuerpo humano la radiación se frena en las capas exteriores de la piel y no es peligrosa, pero se convierte en peligrosa cuando penetra en el interior del organismo por ingestión, inhalación o a través de heridas, dado que deposita su energía en un espacio muy corto, lo que 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 1 o 2 cm en los tejidos vivos. Se frena con una lámina de aluminio. Como blindaje para este tipo de radiación se utilizan planchas de metacrilato.

La radiación X y gamma son radiaciones electromagnéticas. La radiación gamma procede del núcleo del átomo mientras que la radiación X procede de la zona de la corteza del átomo radiactivo. La radiación gamma es más penetrante que la X pero 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 como por ejemplo el plomo, o muros de hormigón.



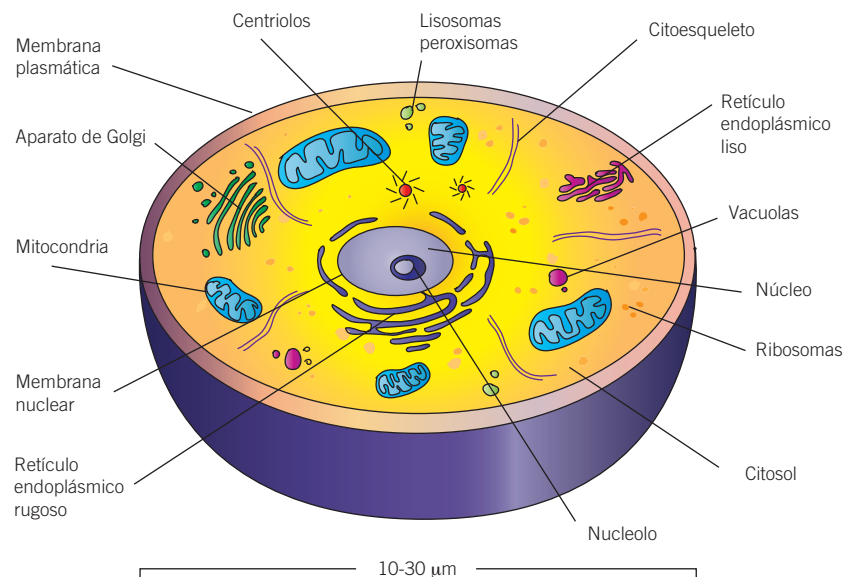
¿Qué efectos produce la radiación ionizante?

Una de las reacciones más importantes que se produce al interaccionar la radiación ionizante con el cuerpo humano, es la radiólisis o rotura de los enlaces químicos de las moléculas, con la posibilidad de que se formen otras moléculas distintas de las originales.

radicales libres

El elemento más abundante en el medio vivo es el agua y la ionización de ésta puede dar lugar a la aparición de *radicales libres* que son moléculas altamente reactivas.

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.



La unidad básica del organismo vivo es la célula, en cuyo núcleo y concretamente en el ácido desoxirribonucleico (*ADN*) se encuentra codificada toda la información genética. Los efectos biológicos que produce la radiación son consecuencia de la transferencia de energía a los átomos y moléculas constituyentes de las células, dando lugar a ionizaciones. 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.

ADN

En función de la forma en que la radiación produce un daño en la salud del individuo los efectos se denominan estocásticos o deterministas.

- Los *efectos deterministas* se deben a la muerte de las células. Si la dosis fuera lo suficientemente elevada, la pérdida celular podría ser tan importante que el tejido quedaría degradado funcionalmente. 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. Además, su gravedad aumenta con la dosis recibida. Los umbrales asociados a estos efectos están frecuentemente en valores de dosis de unos pocos grays (Gy)⁽¹⁾.
- La inducción de cáncer y los efectos hereditarios son *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 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 la hipótesis de que se pueden producir a cualquier nivel de dosis y no existe dosis umbral.

efectos deterministas

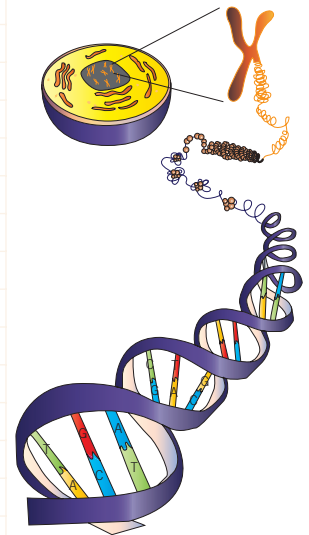
efectos estocásticos

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

En una mujer embarazada los efectos que se pueden producir en el embrión/feto, pueden ser 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.

Se ha demostrado que los efectos deterministas (aborto, malformaciones congénitas o retraso mental) no se producen si el embrión/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.



⁽¹⁾ El sievert (símbolo Sv) es una unidad derivada del sistema internacional que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva (julio por kilogramo (J Kg^{-1}), corregida por los posibles efectos biológicos producidos, mientras que el gray (Gy, unidad de dosis absorbida) mide la energía absorbida por un material. Se cumple la equivalencia $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$ para las radiaciones electromagnéticas (rayos X y gamma) y los electrones, pero para otras radiaciones debe utilizarse un factor corrector.

Por otro lado, la inducción de cáncer, al ser un efecto estocástico, se supone que se 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.

Puntos clave

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).

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 deterministas.

Preguntas/tareas y respuestas

1. ¿Qué es la ionización?
2. Escribe 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. Completa la siguiente tabla:

Radiación	Poder de penetración / material	Penetración en el cuerpo humano
α (alfa)		
β (beta)		
γ (gamma)		
Rayos X		

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?
10. ¿Qué es el efecto hereditario? ¿Por qué se origina?
11. ¿Qué es un efecto determinista? Escribe tres efectos deterministas de la radiación ionizante en el feto.
12. ¿Qué es un efecto estocástico? Cita un ejemplo.

Unidad 3

Protección contra la radiación ionizante

Objetivos

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Reconocerá la necesidad de protección radiológica en aquellas actividades que supongan la presencia de radiaciones ionizantes.
- Conocerá los principios básicos de la protección radiológica.
- Podrá nombrar algunas medidas de protección radiológica, asociándolas con el tipo de riesgo.

Tiempo mínimo propuesto

2 horas

Apoyo documental

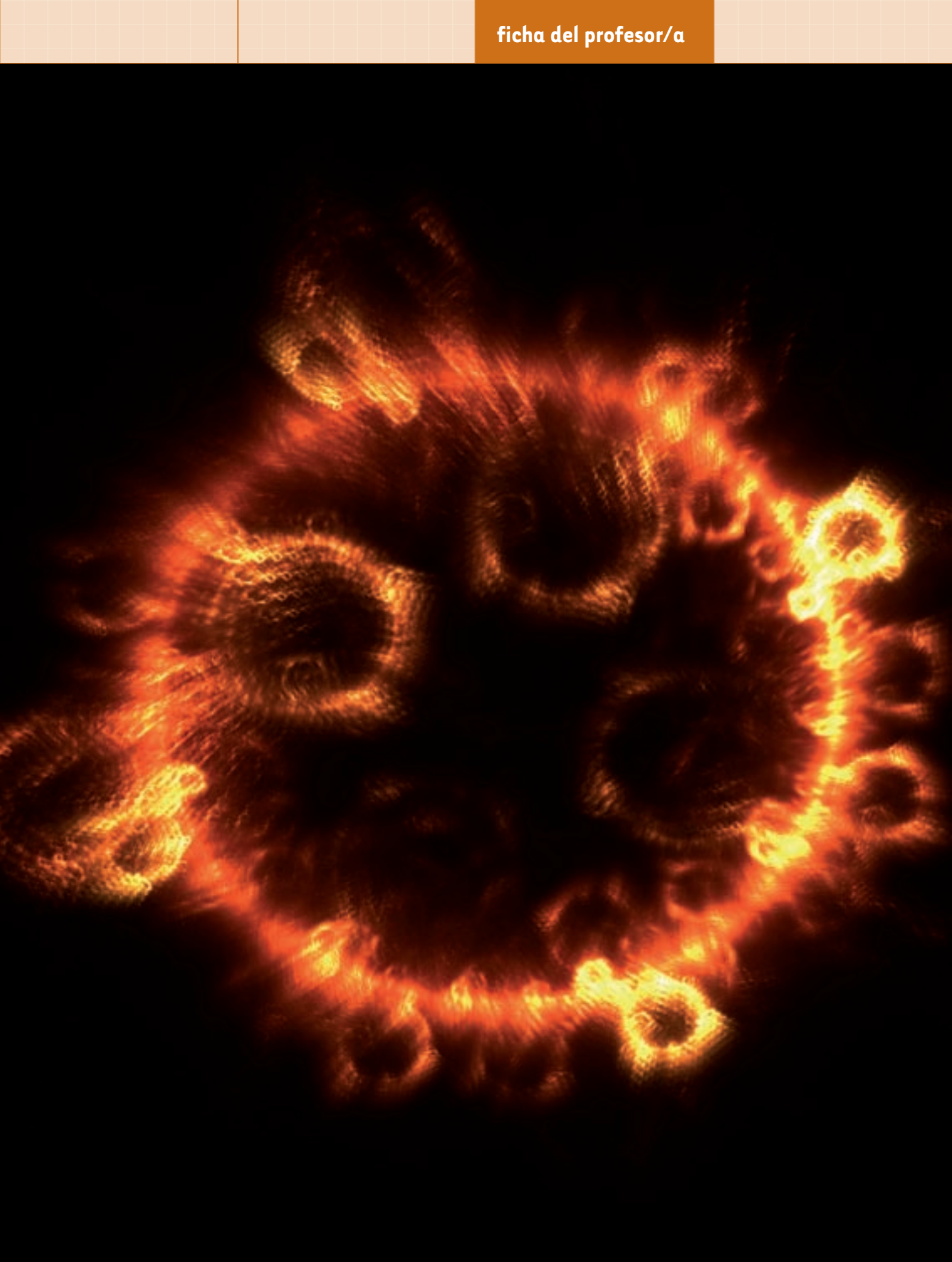
Para una información más detallada sobre protección radiológica, pueden consultarse los siguientes capítulos del Suplemento Técnico: capítulo 4, Radiactividad y radiaciones ionizantes, capítulo 5, Efectos biológicos de la radiación: aspectos legales y capítulo 10, El Consejo de Seguridad Nuclear

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?
2. Enumerar y explicar los tres principios básicos de la protección radiológica.
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?
4. ¿Qué riesgo de radiación puede producir el manejo de fuentes radiactivas no encapsuladas? ¿Qué señal se utilizaría para advertir de este riesgo?
5. ¿Cómo nos protegeríamos de las radiaciones ionizantes cuando el único riesgo es el de irradiación externa?
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?
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?



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, 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 Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes y 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 las 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/a expuesto/a aquel/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 siguiente tabla se muestran los límites recogidos en el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes:

Dosis (mSv)	Trabajadores/as expuestos/as	Miembros público
Dosis efectiva en 5 años	100 mSv	
Dosis efectiva máxima en 1 año	50 mSv	1 mSv
Dosis equivalente en un año:		
– Cristalino	150 mSv	15 mSv
– Piel y extremidades	500 mSv	50 mSv

Límites	Especiales
Trabajadora expuesta embarazada: dosis al feto	1 mSv/embarazo
Personas en formación y estudiantes entre 16 y 18 años	6 mSv/año
Dosis equivalente en un año:	
– Cristalino	50 mSv
– Piel y extremidades	150 mSv

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 sólo 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.

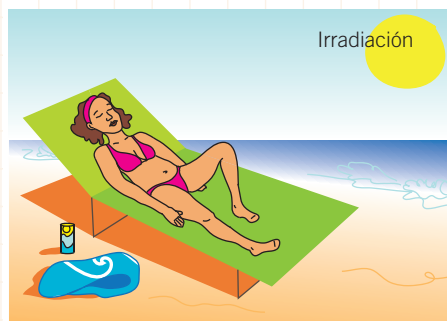
La *irradiación* o exposición es la acción de someter a una persona u objeto a las radiaciones ionizantes. Se habla de irradiación externa cuando la fuente de radiación es exterior al individuo.

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 las características metabólicas de los mismos; 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 período de semidesintegración del isótopo en cuestión.



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) 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 éste 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.



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.

En caso de contaminación externa del organismo, hay que eliminarla para evitar que ésta 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 éstas 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.



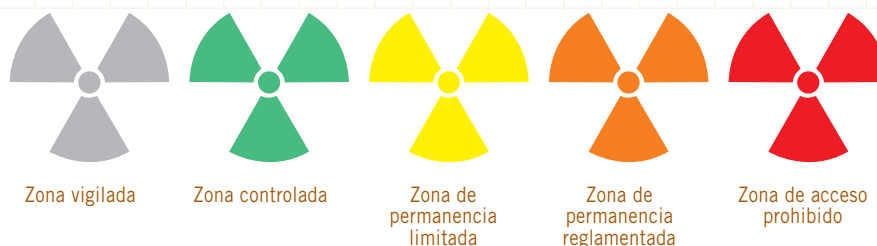
Equipos de protección individual

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.



- 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 alumno/a:

- Relacionará las técnicas de diagnóstico (radiodiagnóstico, medicina nuclear, y radioinmunoanálisis) con sus principales aplicaciones.
- Valorará la aplicación de la informática al diagnóstico en medicina.
- Conocerá en qué consiste la radioterapia y cómo se utiliza en el tratamiento contra el cáncer.
- Comprenderá la importancia de evaluar ventajas y riesgos de la radiación ionizante en medicina.
- Se concienciará de 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: aspectos legales

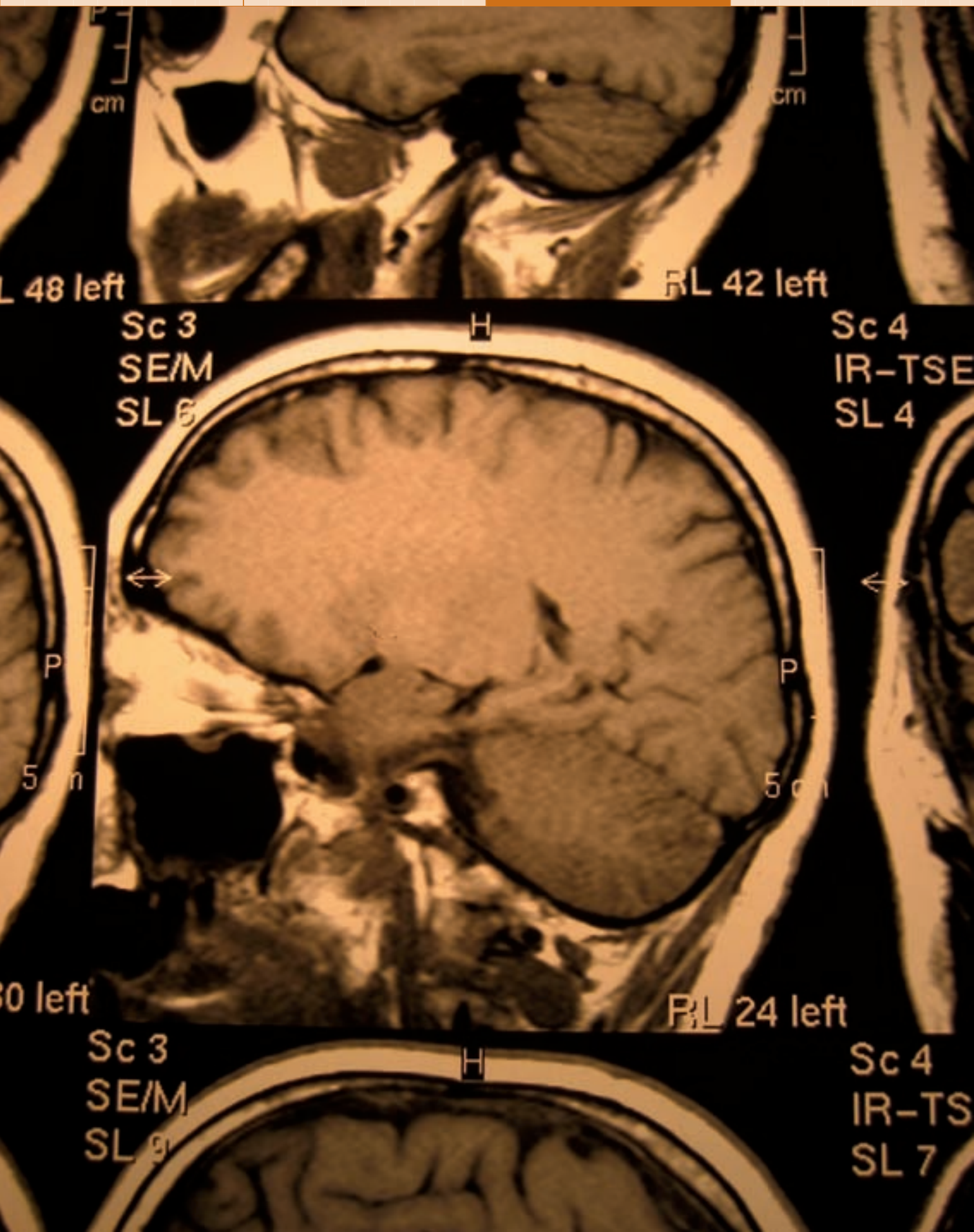
Sugerencias didácticas

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 los alumnos/as leen el tema y responden las preguntas propuestas.

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 4

Aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes

La radiación ionizante, bien en forma de isótopos radiactivos (radiofármacos) 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 Röntgen 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 mostrará una sombra de los huesos que proporciona una imagen de su forma y posición en el cuerpo. Posteriormente se han ido perfeccionando los equipos y ahora pueden mostrar órganos 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 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 (kV). 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 represente al hueso, ya que los

pulmones fundamentalmente tienen aire y éste 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 una placa fotográfica. Dentro de la radiología convencional, existen distintos tipos de exámenes radiológicos como son: tórax, abdomen, columna lumbar, columna cervical, columna dorsal, etc.
- Otro tipo de exploraciones convencionales muy habituales son las dentales. Se realizan con equipos de rayos X especiales. Las radiografías más comunes en este campo son las intraorales, las ortopantomografías y los TC (Tomografía Computerizada) dentales.
- Fluoroscopia: es la técnica en la que el receptor de imagen es una pantalla fluorescente que se ilumina al incidir sobre ella el haz de rayos X. La intensidad de esta imagen luminosa que aparece en la pantalla es amplificada por medio de intensificadores de imagen y recogida por una cámara de televisión para ofrecerla en un monitor de TV.
- Tomografía Computerizada (TC): permite obtener imágenes de cortes transversales del cuerpo humano cuyo tratamiento informático posibilita su reconstrucción en tres dimensiones.

La aplicación de la informática al diagnóstico médico ha permitido mejorar la obtención, el almacenamiento y el tratamiento de la imagen (*radiología digital*). El tratamiento digital de las imágenes médicas se utiliza en técnicas como la tomografía computerizada (TC), la angiografía digital, la medicina nuclear y, desde hace poco tiempo, se aplica en la



Tomografía

radiología convencional, incluso en las dentales. Una característica muy importante de la imagen digital es que ésta se puede tratar, es decir, si una radiografía ha salido muy clara se puede dar una mayor intensidad de grises, o si ha salido muy oscura se puede reducir su intensidad. También se pueden seleccionar determinadas zonas de la imagen para su estudio más detallado. En la actualidad, el desarrollo de la informática permite, no sólo 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 previamente la zona de interés, mediante la administración por vía intravenosa de contrastes.

- Radiología intervencionista: la radiología intervencionista es una rama de la radiología, que mediante procedimientos mínimamente invasivos, diagnostica y trata diversas patologías, tanto en el sistema vascular como fuera de él. Por tanto existe una radiología intervencionista diagnóstica y otra terapéutica. La radiología intervencionista terapéutica, evita cirugías más dolorosas, más incómodas y reduce el tiempo de hospitalización posterior.

Medicina nuclear

Es la especialidad médica que realiza diagnósticos por imagen y tratamientos mediante la utilización de *radiofármacos*⁽²⁾ que son compuestos que permiten estudiar la morfología y el funcionamiento de los órganos, incorporándose a ellos y emitiendo una pequeña cantidad de radiación que es detectada por unos equipos llamados gammacámaras.

Los datos funcionales que aporta la medicina nuclear son muy valiosos, tanto del riñón, como del cerebro o el corazón.

Entre los últimos avances, destacan la SPECT (Single Photon Emission Computer Tomography), la Tomografía por Emisión de Positrones (PET) y el PET-TC:

- 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 detecta las áreas del cerebro que no funcionan correctamente.
- 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.

⁽²⁾ Radiofármaco: es la asociación de un fármaco que transporta el isótopo radiactivo al lugar de interés.

- PET: existe otra técnica denominada Tomografía por Emisión de Positrones (PET). Se trata de un proceso de diagnóstico por imagen en el cual se administran a los pacientes isótopos radiactivos emisores β^+ (positrones) que se caracterizan por su corto periodo de semidesintegración y por ser elementos fundamentales de las diferentes moléculas del organismo (oxígeno, carbono, etc.). 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.

El PET es fundamental en el estudio de patología cardíaca, neurológica y oncológica. Últimamente se están incorporando equipos PET que tienen asociado un TC, lo que permite al mismo tiempo que se obtiene un estudio funcional de un órgano, poder localizar con muy alta precisión donde se encuentra la lesión o alteración anatómica.

Radioinmunoanálisis (RIA)

Es una técnica analítica utilizada para medir la cantidad y concentración de numerosas sustancias (hormonas, fármacos, etc.) en muestras biológicas obtenidas, previamente, del paciente. Tiene una elevada sensibilidad, permitiendo medir concentraciones muy pequeñas. Se utiliza en diagnóstico clínico así como en investigación biológica. 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). Se utilizan actividades muy pequeñas.

Terapia

Radioterapia

El objetivo de la radioterapia es la destrucción de células y tejidos tumorales mediante la radiación, procurando irradiar lo menos posible los tejidos sanos circundantes al tumor. Ello se consigue mediante una planificación individualizada para cada paciente, utilizando simuladores para toma de datos y planificadores, que permiten la reconstrucción de la distribución de la dosis y de la zona a irradiar en una imagen tridimensional. 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).

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 trabajan hasta con 250.000 voltios. Para un voltaje más elevado debe utilizarse un acelerador lineal que aumenta la energía por etapas y puede alcanzar hasta 20 millones de voltios.
- Radioterapia con fuente de cobalto-60. Utiliza cobalto-60 en fuentes selladas muy compactas, de aproximadamente 1 centímetro de anchura, con actividad suficiente para proporcionar dosis muy altas al tumor. Actualmente se está dejando de usar.
- Braquiterapia. Utiliza la radiación beta y gamma de isótopos que pueden introducirse en el cuerpo del paciente. Las fuentes emisoras de radiación pueden ser internas (braquiterapia de baja tasa de dosis, en la que la fuente muchas veces se deja permanente dentro del organismo) o externas (braquiterapia de alta tasa de dosis, por contacto). En este último caso se trata de situar la fuente cerca del tumor (siempre dentro del cuerpo) de forma que en el resto del cuerpo se reciban dosis más reducidas. Posteriormente es retirada y guardada en su blindaje (por eso es externa). Se usan el cesio-137, el iridio-192, y el yodo-125, entre otros.



Acelerador lineal



Aparato de braquiterapia

- Radioterapia metabólica. Como ya hemos comentado, algunos radiofármacos pueden introducirse en el interior del cuerpo del paciente y el tratamiento dependerá de la capacidad del cuerpo para concentrar el isótopo en el tumor. Este procedimiento es muy eficaz en tumores de la glándula tiroides, en los que se concentra el yodo-131. También se utilizan otros como el samario-153 para el tratamiento de los dolores óseos.

Transporte

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 contiene 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 isotópica sufre un rápido decaimiento radiactivo, y precisa ser transportado de manera urgente.

Hasta su destino final, en hospitales o establecimientos sanitarios, estos materiales, que van contenidos en embalajes de pequeño tamaño, son transportados por carretera.

Los residuos radiactivos generados como consecuencia de las aplicaciones médicas son transportados hasta los centros de tratamiento o almacenamiento.

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 97/43/Euratom, que fija las medidas de radioprotección del paciente, en varios reales decretos. El objetivo es garantizar la mejora de la calidad y eficacia del acto radiológico médico, 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 las radiaciones en un acto médico deberá estar justificada (Real Decreto 815/2001, de 3 de julio, de las radiaciones ionizantes, sobre justificación del uso para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas), realizarse al nivel más bajo posible de dosis compatible con el objetivo de la prueba diagnóstica y se llevará a cabo, siempre, bajo la responsabilidad del médico especialista.

- Todo el personal involucrado (médicos y operadores) deben poseer los conocimientos adecuados sobre técnicas aplicadas y las normas de radioprotección.
- 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 de goma y cubiertas para calzado, filtros de aire, etc. Se generan fundamentalmente en las instalaciones de medicina nuclear y en las de radioterapia.

Un aspecto importante en el desarrollo de la 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 almacenarlos adecuadamente. Las instalaciones generadoras de residuos radiactivos disponen de lugares específicos para el almacenamiento seguro de los mismos hasta su posterior evacuación controlada.

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 del acto radiológico médico, 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 alumno/a:

- Podrá clasificar las distintas fuentes de radiaciones ionizantes.
- Comprenderá 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.
- Sabrá que un efecto de la radiación es la esterilización, y conocerá los campos en los que se utiliza la radiación para esterilización.
- Reconocerá 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 8 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/as contestan 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.
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. Citar 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 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 sólo 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 o el grado de biodegradación de insecticidas

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 y gammagrafía industrial para control de calidad. Se trata de una técnica de ensayos no destructivos (no es necesario destruir la pieza para estudiarla).
- Irradiación industrial mediante fuentes radiactivas encapsuladas o aceleradores. Se utilizan para esterilización de materiales, conservación de alimentos o modificación de las características de los materiales irradiados.
- Radiotrazadores, mencionados anteriormente.
- Otros usos, como detectores de humo iónicos, inspección de equipos y paquetería, detección de explosivos, datación con carbono-14, etc.

Equipos de control de proceso

La radiación al interactuar 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. También se puede utilizar esta técnica para medir el nivel de llenado de botellas o de depósitos que contengan líquidos.



Equipo de control de proceso

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. Para ello se han diseñado equipos que incorporan en un solo instrumento fuentes radiactivas encapsuladas para medida de densidad y humedad.



Equipo de uso en sondeos

Equipos para análisis de muestras en laboratorio

Para el análisis de muestras se pueden utilizar técnicas como la fluorescencia de los rayos X o la difracción de rayos X. Se utiliza la fluorescencia de rayos X cuando se quiere conocer la composición elemental exacta de una sustancia; y la difracción de rayos X se utiliza para conocer la estructura cristalina de una muestra.

Equipos de radiografía y gammagrafía 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 radiografía industrial similares a los utilizados para la radiografía médica, aceleradores o equipos que incorporan fuentes de rayos gamma (gammagrafía industrial). 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.



Gammógrafo industrial

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, alimentos, control de plagas, 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 irradiación 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.
- 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. estos aparatos se encuentran instalados en aeropuertos, aduanas, edificios oficiales, etc.



Equipo de inspección de grandes cargas



Equipo de inspección de bultos

Otra técnica radiactiva utilizada en la investigación es la datación por carbono 14. El carbono tiene tres isótopos: C-12, C-13 y C-14. Este último es muy inestable y se estabiliza emitiendo partículas beta. El C-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 C-14 que hay en la atmósfera.

Cuando el ser vivo muere ya no incorpora más átomos de C-14, y empieza a desintegrarse transformándose en N-14. Como se sabe que el periodo de semidesintegración del C-14 es 5.730 años (tiempo necesario para que se desintegren la mitad de los átomos de una muestra inicial), conociendo la cantidad de C-14 que existe en el organismo y la que se ha desintegrado, se puede calcular el tiempo que ha pasado.



Aplicaciones del carbono 14

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: control de fugas en presas y canalizaciones, mejora de riesgos...*

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 energía de origen nuclear

Objetivos

Al final de la unidad, el alumno/a:

- Podrá diferenciar los conceptos de fisión y fusión.
- Podrá describir las partes de un reactor nuclear.
- Sabrá que existen dos tipos de centrales nucleares (central de ebullición y de presión), y conocerá su funcionamiento básico.
- Identificará los países de la Unión Europea con mayor producción de energía nuclear.
- Comprenderá el proceso de fusión.
- Conocerá el proyecto ITER.

Tiempo mínimo propuesto

2 horas (opcionalmente, 1 hora).

Apoyo documental

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

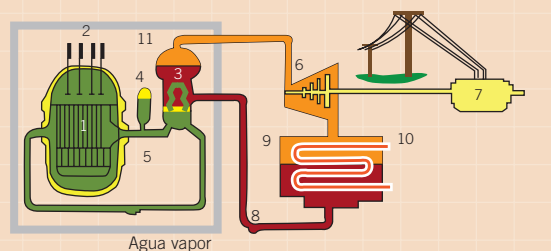
Sugerencias didácticas

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 eliminando los nombres de cada parte en los esquemas y pedir a los alumnos/as que durante la explicación vayan identificándolas. Después, se repasa la reacción de fusión y se detalla la situación de los proyectos que actualmente se encuentran en marcha.

Los alumnos/as 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?
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. Correlacionar los distintos componentes con los números del esquema:



■ Circuito primario ■ Circuito secundario ■ Circuito de refrigeración exterior

Núcleo
Presionador
Generador de vapor
Bomba de recirculación
Alternador
Barras de control

Turbina
Vasija del reactor
Edificio de contención
Agua de refrigeración
Condensador

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 y 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 y dónde se está construyendo?



Unidad 6

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, etc. Dependemos tanto de la electricidad que cualquier interrupción en el suministro perturba nuestra vida.

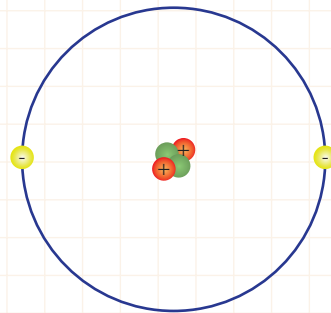
Obtenemos electricidad de las centrales eléctricas. Algunas de ellas utilizan carbón, petróleo o gas. Para satisfacer la creciente demanda de energía y evitar una excesiva dependencia de los combustibles fósiles, muchos países utilizan la energía nuclear de fisión para obtener parte de la energía eléctrica 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, en que 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. Aún así, en las explicaciones siguientes seguiremos el modelo de Bohr. En la figura se representa el átomo de helio, con los protones de color rojo, los neutrones de color verde y girando alrededor de éstos los electrones, de color amarillo.



Átomo de helio

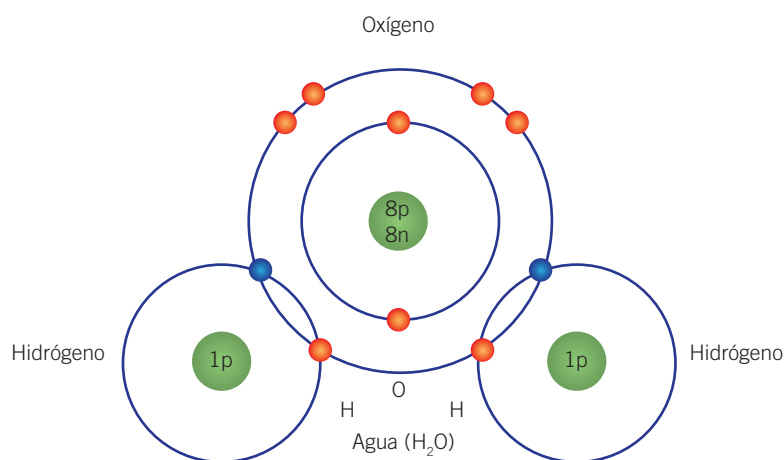
Esta idea nos da una imagen muy útil del átomo. Así, los *electrones* son pequeñas partículas cargadas de electricidad; cada electrón tiene una carga negativa y puede eliminarse de los átomos de algunos materiales con una simple frotación (se conoce como electricidad estática). El átomo en su estado 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*.

Los protones y los neutrones son unas 2.000 veces más pesados que un electrón y componen la masa del átomo. El número total de protones y neutrones es el *número másico*.

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, que es un átomo de mayor tamaño que el helio y tiene en su núcleo ocho protones y ocho neutrones. Naturalmente, el oxígeno debe tener un número atómico de ocho, que equivale a los ocho protones que están compensados por ocho electrones 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 de la exterior son los que pueden eliminarse por ionización y son también los causantes de las propiedades químicas del elemento.



El *agua* es una molécula compuesta de 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 sólo 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. La energía liberada en esta reacción es la fuente de calor en la combustión del hidrógeno.

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

Podría pensarse que el núcleo de hidrógeno, al tener sólo 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 llamamos deuterio, y el hidrógeno-3, con dos neutrones, que se llama tritio. Estos tres tipos de hidrógeno son isótopos del hidrógeno. Más adelante veremos que el “adhesivo” no funciona muy bien en el núcleo del tritio.



Los elementos pueden disponerse en una *tabla periódica*, 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) y las filas horizontales se llaman **períodos** (los elementos que componen una misma fila tienen propiedades diferentes pero masas similares: todos los elementos de un período tienen el mismo número de orbitales).

114

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. 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. Éste es uno de los cuatro tipos principales de radiación ionizante que emite el núcleo para hacerse más estable. En la unidad 2 se han descrito los tipos de radiación ionizante emitidos por un isótopo radiactivo.

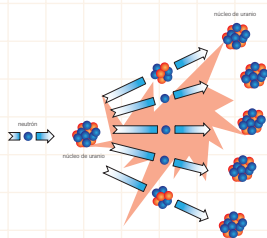
La estabilidad o inestabilidad de los núcleos está ligada a su estructura. Para un valor determinado del número atómico, existe un cierto intervalo del número de neutrones, que configuran nucleidos estables, llamado *banda isotópica de estabilidad nuclear*. Se conoce como isótopos a los átomos que tienen 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, éste 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*. 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.



Reacción en cadena

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*.

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, etc.

El *refrigerante*, El calor generado en un reactor debe eliminarse de forma adecuada, no sólo 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 (CO_2) o el helio. Cuando se emplea agua, ésta 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 1.700 millones de años en un depósito de uranio en África (en Oklo, Gabón) se produjo espontáneamente una reacción de fisión en cadena.

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



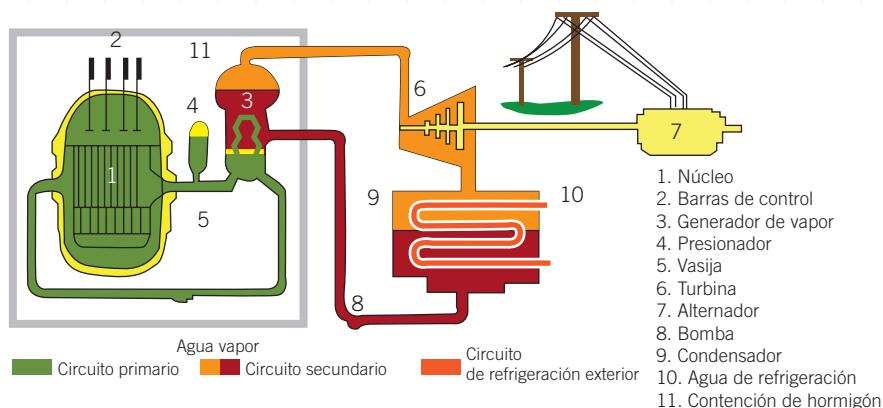
Elemento combustible

Centrales nucleares 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.



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. Este 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).

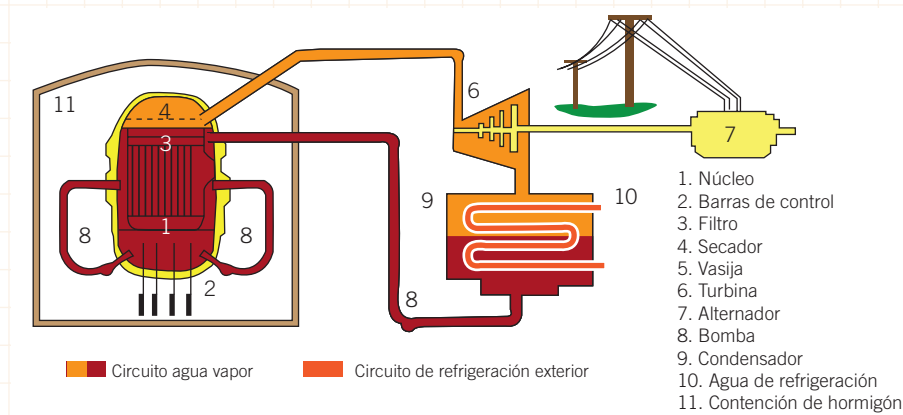
El vapor que circula por el exterior de los tubos del condensador se condensa al enfriarse y es enviado de nuevo al generador de vapor para volver a convertirse en vapor.

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 es el 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)

Es muy parecido al reactor a agua a presión pero 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 mismo agua interviene, además, como moderador de la reacción nuclear.



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 donde 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 la Unión Europea

La siguiente tabla muestra el uso de la energía nuclear para la producción de electricidad en la Unión Europea; resume los reactores en operación, en construcción, clausurados y porcentaje de producción en los diferentes países.

País	En operación		En construcción		Clausurados		Producción nuclear
	Nº de unidades	Total MWe	Nº de unidades	Total MWe	Nº de unidades	Total MWe	% en 2008
Alemania	17	20.470	—	—	19	5.879	28,29
Bélgica	7	5.824	—	—	1	10	53,76
Bulgaria	2	1.906	2	1.906	4	1.632	32,92
Eslovaquia	4	1.711	—	—	3	909	56,42
Eslovenia	1	666	—	—	—	—	41,71
España	8	7.450	—	—	2	621	18,27
Finlandia	4	2.696	1	1.600	—	—	29,73
Francia	59	63.260	1	1.600	11	3.798	76,18
Holanda	1	482	—	—	1	55	3,80
Hungría	4	1.859	—	—	—	—	37,15
Italia	—	—	—	—	4	1.423	—
Lituania	1	1.185	—	—	1	1.185	72,89
Reino Unido	19	10.097	—	—	26	3.324	13,45
República Checa	6	3.634	—	—	—	—	32,45
Rumanía	2	1.300	1	655	—	—	17,54
Suecia	10	8.958	—	—	3	1.225	42,04
TOTAL	145	131.498	5	5.761	75	20.061	

(Datos de marzo de 2009, recopilados del PRIS de la página web del OIEA).

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, desprendiéndose grandes cantidades de energía.

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 experimentando 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 de fusión. Este reactor será el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), y actualmente se encuentra en fase de construcción en Francia. Concebido para producir diez veces más energía de la necesaria para inducir la fusión, se basa en el modelo Tokamak. Con una altura total de 30 m y una anchura de 40, la vasija del ITER, en forma de donut, 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.

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.

Puntos clave

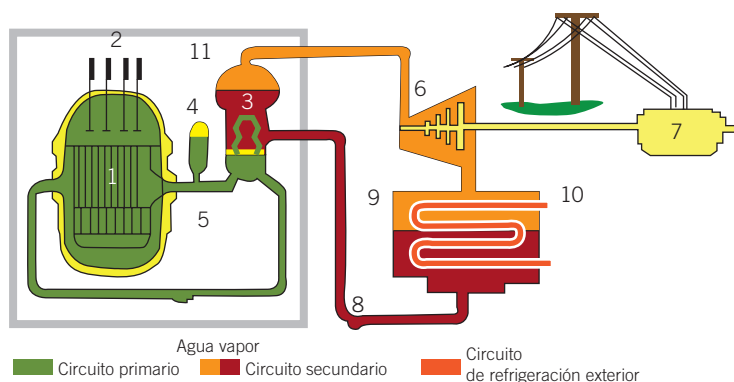
El átomo puede describirse como un conjunto de capas de electrones y un núcleo en el que, gracias a la fuerzas nucleares, coexisten protones y neutrones.

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 y 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 alumno/a:

- Sabrá lo que son los residuos radiactivos.
- Conocerá el origen de los residuos radiactivos.
- Podrá clasificar 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.
- Sabrá que Enresa es 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 8 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/as pueden leer individualmente el tema y contestar a las preguntas propuestas.

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? Realizar un pequeño trabajo sobre esta instalación (dónde se encuentra ubicada, para qué se utiliza este centro, cuándo empezó a funcionar, etc...)
7. ¿Qué se hace en España con el combustible gastado de una central nuclear? ¿Qué otras alternativas conoces? ¿Qué es la transmutación?



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.



Combustible gastado procedente de las centrales nucleares

- 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.



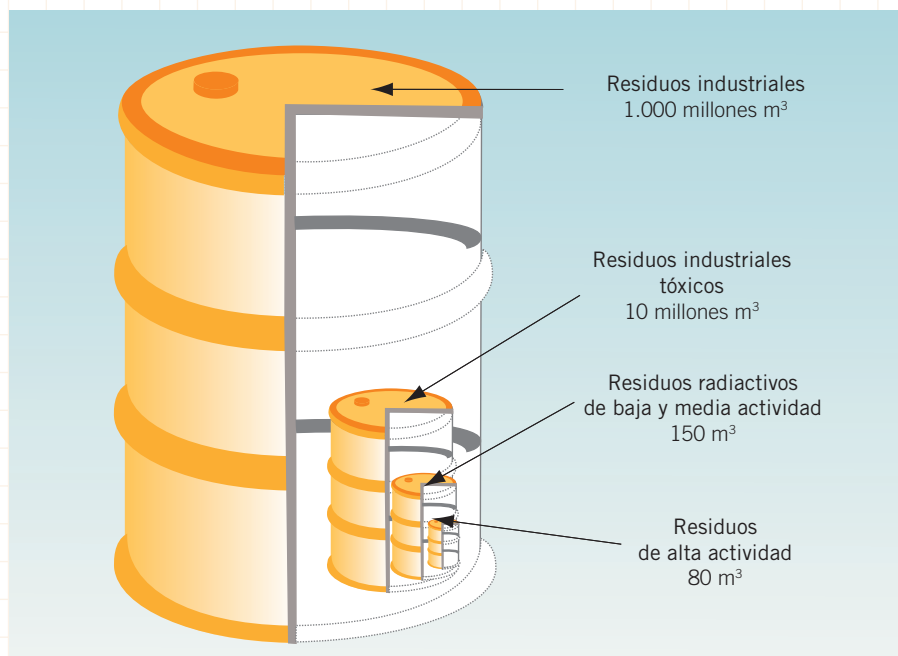
Residuos radiactivos procedentes de aplicaciones en medicina e investigación

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 de los isótopos radiactivos que mayoritariamente contengan (residuos de vida larga aquellos que contienen cantidades importantes de isótopos radiactivos cuyo periodo de semidesintegración sobrepasa 30 años y de vida corta en caso contrario).

En España hay que gestionar las siguientes cantidades de residuos radiactivos:

- Residuos de *baja y media actividad* (RBMA) y residuos de *muy baja actividad* (RBBA): 176.000 m³.
- Combustible gastado de las centrales nucleares y residuos de *alta actividad* (RAA): 12.800 m³.

En comparación con otros tipos de residuos, las cantidades de residuos radiactivos que se generan anualmente en toda la Unión Europea son pequeñas:



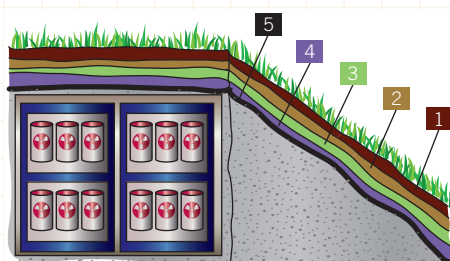
Producción anual de residuos en la UE

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.

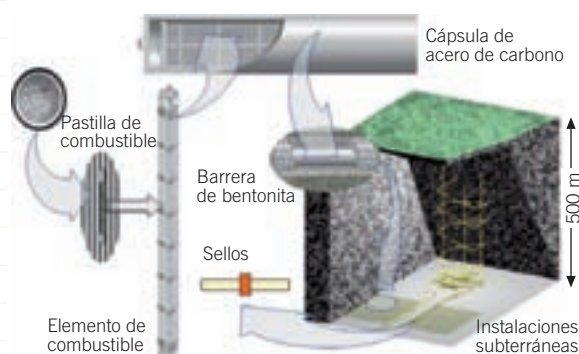
Para ello los residuos radiactivos se concentran y se confinan hasta que su radiactividad desaparece, aislándolos del medio ambiente y de las personas mediante *barreras* que aseguran que los contaminantes radiactivos no se dispersarán y podrán llegar a producir algún daño.

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).



Esquema instalación de almacenamiento en la superficie.

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1 Capa filtrante | 4 Arcilla, impermeable |
| 2 Escollera | 5 Cobertura |
| 3 Arena y grava | |



Instalación de almacenamiento en la superficie

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).



Centro de almacenamiento en superficie de residuos de baja y media actividad de El Cabril. 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 la 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.

Contenedores

Modelo descriptivo del contenedor ENSA DPT



El contenedor ENSA-DPT se introduce en la piscina.



En el contenedor, que dispone de un bastidor con capacidad para 21 elementos, se van cargando los elementos (siempre bajo agua).

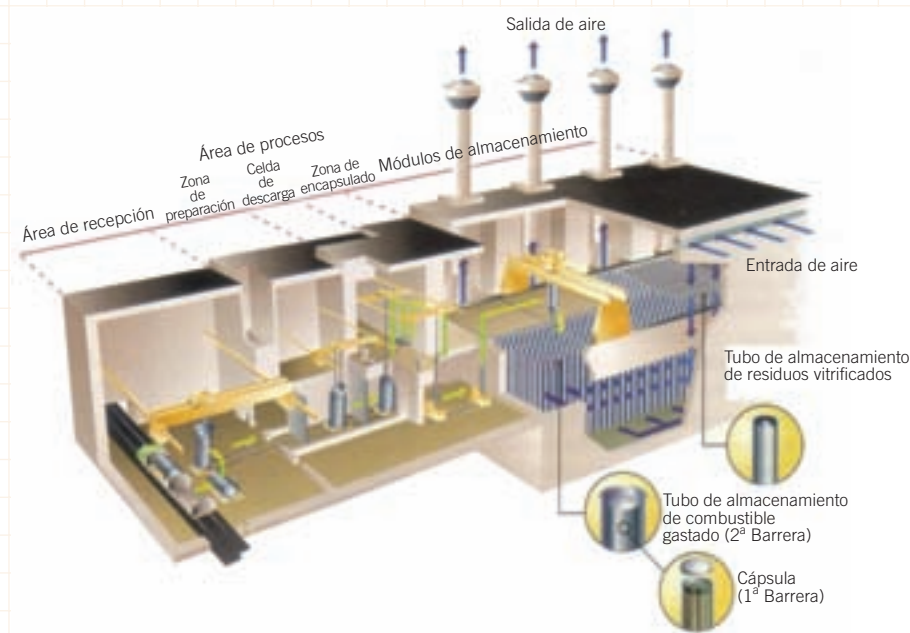
- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1 Tapa superior | 8 Fondo |
| 2 Brida Superior | 9 Muñones de izado |
| 3 Virola interior | 10 Aleta bimetálica |
| 4 Virola interior intermedia | 11 Tejas envolventes |
| 5 Plomo | 12 Blindaje neutrónico |
| 6 Virola exterior | 13 Cercos envolventes |
| 7 Anillo inf. muñones | |



Actualmente existen en operación ATI en las centrales nucleares de Trillo y José Cabrera.

La opción preferente para el almacenamiento temporal del combustible gastado es la construcción de un Almacén Temporal Centralizado (ATC) que será 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.

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 blindará 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.



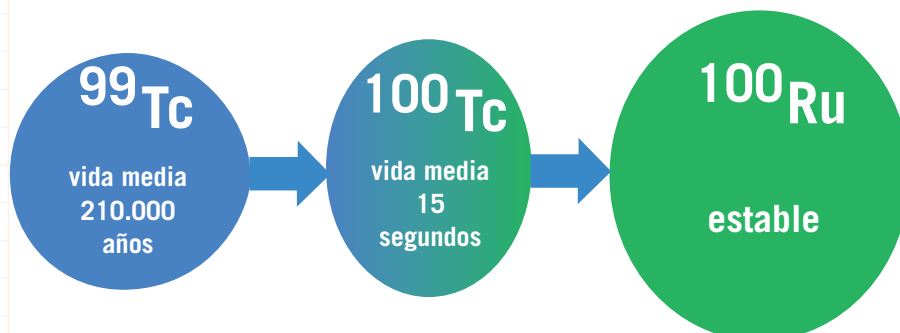
Esquema de AIC. Cámaras

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 Tc-99, que tiene una vida media muy larga. Si el Tc-99 se irradia con neutrones, se transforma en Tc-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, cuándo empezó a funcionar, etc...)
7. ¿Qué se hace en España con el combustible gastado de una central nuclear? ¿Qué otras alternativas conoces? ¿Qué es la transmutación?



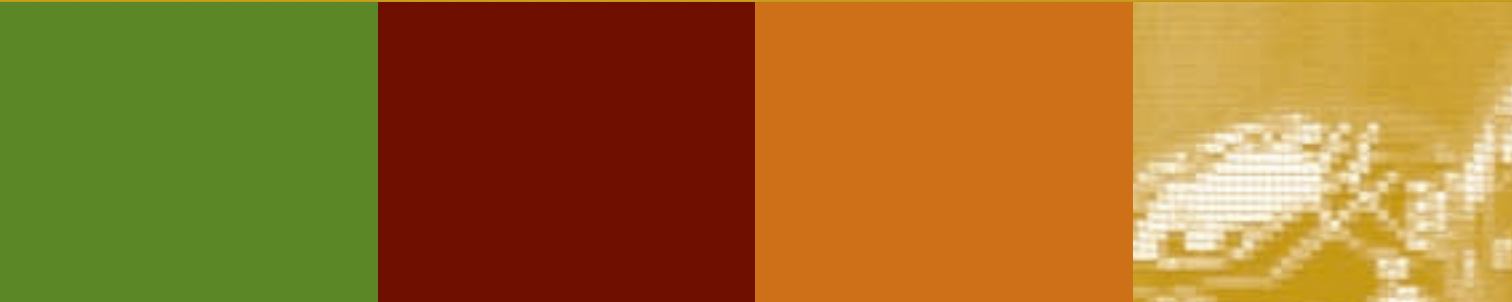
suplemento técnico





suplemento técnico

132		1	Antecedentes históricos
137		2	La estructura del átomo
140		3	Espectro de ondas electromagnéticas: radiación ionizante y no ionizante
144		4	Radiactividad y radiaciones ionizantes
149		5	Efectos biológicos de la radiación: aspectos legales
153		6	Ciclo del combustible nuclear y funcionamiento de las centrales nucleares
158		7	Otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes
167		8	Residuos radiactivos: origen y gestión
174		9	El Consejo de Seguridad Nuclear



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.

Hasta comienzos del siglo XX no se sabía casi nada sobre el átomo y su núcleo, y 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, si bien todo empezó con Demócrito quien ya en el siglo V antes de Cristo sustentó la teoría de que toda la materia conocida está formada por átomos o combinaciones de ellos, siendo el “átomo” la parte más pequeña constituyente de la materia que no se puede dividir.

John Dalton propuso en 1803 una teoría sobre la constitución de la materia basada en la idea de los átomos, a los que imaginaba como diminutas esferas, concluyendo que todos los átomos de un mismo elemento eran idénticos, en tanto que los átomos de elementos distintos diferían en sus propiedades químicas. Desde el momento en que Dalton estableció su clasificación de la materia en la que toda ella se dividía en elementos y compuestos, la labor de los químicos de la época se orientó a la búsqueda de estos elementos simples y en ordenarlos de alguna manera lógica.

En 1869, Lothar Meyer y Dimitri Mendeleiev ordenaron los elementos de forma muy parecida a la Tabla Periódica actual, el primero según su volumen atómico y los puntos de fusión y de ebullición, observando que variaban periódicamente al aumentar el peso atómico, y Mendeleiev según sus propiedades químicas, ya que estaba convencido de que estaban relacionadas con su peso atómico. En esta clasificación de Mendeleiev se encontraron algunas anomalías que fueron solventadas en los primeros años del siglo XX al desarrollarse el concepto de número atómico. Moseley estableció la base

del sistema periódico actual en la que los elementos se ordenan por su número atómico creciente, y demostró en 1914 que cada elemento químico presentaba un número atómico diferente. Después de varias modificaciones se llegó a la Tabla Periódica actual con 118 elementos distribuidos en siete filas o períodos y dieciocho columnas o grupos.

El primer tipo de radiación ionizante artificial que ha utilizado el ser humano fue descubierto por W. C. Röntgen en 1895. Cuando se encontraba experimentando el poder de penetración de los rayos catódicos observó que una placa de cartón cubierta de cristales de sales de bario, emitía una fluorescencia. Ésta desaparecía cuando desconectaba la corriente. Pronto descubrió que esos rayos (que él llamó “X”) atravesaban distintos tipos de materiales como papel, madera, una delgada lámina de aluminio, etc., pero el plomo no. También se dio cuenta de que al sostener un aro de plomo con sus dedos, no sólo veía el aro sino también los huesos de su mano. Se le ocurrió que podía “imprimir” la imagen en una placa fotográfica. Fue así como hizo la primera radiografía.



La radiactividad fue descubierta en 1896 por el físico francés Henri Becquerel mientras trabajaba en su laboratorio con sales de uranio. Cerca de las sales, en uno

de los cajones del armario, tenía un paquete con unas placas fotográficas nuevas y convenientemente envueltas. Estas placas quedaron veladas y Becquerel se afanó en buscar la causa de esas misteriosas “emanaciones” o “radiaciones” que impresionaban las placas fotográficas a pesar de hallarse cubiertas con un papel negro, y separadas por una lámina de vidrio. Fue descartando posibles fuentes hasta descubrir que el origen de estas radiaciones eran las sales de uranio.

Desde ese instante, muchos de los físicos de la época se lanzaron al estudio de este fenómeno. Los pioneros y más destacados fueron el matrimonio Curie; quienes nada más tener noticia del descubrimiento de Becquerel, se dedicaron a tratar en su propia casa toneladas de pechblenda, mineral de uranio, con el fin de concentrar este elemento. En 1898 confirmaron que la radiactividad es un fenómeno asociado al núcleo atómico, independiente del estado físico de la sustancia o del tipo de compuesto que forme y que a medida que el uranio emitía radiaciones se iba transformando en otros elementos químicos distintos, nombrados como radio y polonio. Este descubrimiento les hizo merecedores, junto con Becquerel por su descubrimiento de la radiactividad natural, del Premio Nobel de Física en 1903.

En 1897, J.J. Thomson anunció el descubrimiento de una partícula cargada negativamente a la que llamó electrón. Por su descubrimiento recibió el Premio Nobel de Física en 1906.

Luego del descubrimiento del electrón, Thomson determinó que la materia se componía de dos partes, una negativa y una positiva. La parte negativa estaba constituida por electrones que se encontraban, según este modelo, inmersos en una masa de carga positiva a manera de pasas en un pastel

Más tarde, Rutherford y Soddy analizaron las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas constatan-do la existencia de tres tipos de radiaciones ionizantes que denominaron alfa, beta y gamma. Las dos primeras estaban constituidas por partículas cargadas, comprobándose que las partículas alfa eran núcleos de átomos de helio y las partículas beta eran electrones. Además se comprobó que las radiaciones gamma eran de naturaleza electromagnética.

El descubrimiento de la naturaleza de estas radiaciones permitió a Rutherford estudiar la estructura de la materia concluyendo que el átomo estaba constituido por una zona central positiva donde se concentraba toda la masa, y que los electrones giraban en órbitas alrededor del núcleo, como si fuera un pequeño sistema solar. La suma de las cargas de los electrones es igual en magnitud a la carga del núcleo, por lo que el átomo resultaba ser eléctricamente neutro. Este modelo era inconsistente con la electrodinámica clásica donde se postulaba que una partícula girando en movimiento acelerado emite radiación y pierde así energía, lo que haría que los electrones se precipitaran sobre el núcleo. Tampoco explicaba el espectro atómico.

En 1900, Max Planck formuló que la energía es emitida en pequeñas unidades individuales conocidas como cuantos. Por sus estudios Planck es considerado el creador de la teoría cuántica y recibió el Premio Nobel de Física en 1918. Sus estudios proporcionaron las bases para la investigación en campos como el de la energía atómica.

Albert Einstein, con su ecuación $E = mc^2$ revolucionó los estudios posteriores de física nuclear, ya que esta ecuación relacionaba masa y energía, de forma que se podía afirmar, que ambas entidades son distintas manifestaciones de una misma cosa. En 1905 Einstein publicó sus estudios sobre la Teoría de la Relatividad Restringida y acerca del Fenómeno Fotoeléctrico, en la que explicaba el citado fenómeno aplicando la teoría de cuantos de energía propuesta por Max Planck. Por este último trabajo recibió el premio Nobel de Física en 1921.

En 1913, Niels Bohr desarrolló una hipótesis según la cual los electrones estaban distribuidos en capas definidas, o niveles cuánticos, a cierta distancia del núcleo, constituyendo la configuración electrónica de los distintos elementos. Este modelo aplicó la mecánica cuántica al modelo de Rutherford y vino a resolver el problema que este último planteaba desde el punto de vista de la electrodinámica clásica. Según este modelo, los electrones giraban en órbitas estacionarias desde las que no emitían ninguna radiación, pero, estos electrones pueden saltar de una a otra órbita. Si lo hace desde una de menor energía a una de mayor energía absor-

be un cuanto de energía (una cantidad) igual a la diferencia de energía asociada a cada órbita. Si pasa de una de mayor 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.

Ernest Rutherford en el año 1918 definió la existencia de los núcleos de hidrógeno. Rutherford sugirió que el núcleo de hidrógeno, cuyo número atómico se sabía que era 1, debía ser una partícula fundamental. Se adoptó para esta nueva partícula el nombre de protón sugerido en 1886 por Goldstein para definir ciertas partículas que aparecían en los tubos catódicos.

Después de que Louis-Victor de Broglie propusiera la naturaleza ondulatoria de la materia en 1924, que fue generalizada por Erwin Schrödinger en 1926, se actualizó nuevamente el modelo del átomo.

En el modelo de Schrödinger se abandona la concepción de los electrones como esferas diminutas con carga que giran en torno al núcleo, que es una extrapolación de la experiencia a nivel macroscópico hacia las diminutas dimensiones del átomo. En vez de esto, Schrödinger describe los electrones por medio de una función de onda, el cuadrado de la cual representa la *probabilidad de presencia* en una región delimitada del espacio. Esta zona de probabilidad se conoce como orbital.

Durante la década de 1930, Irene y Jean Frédéric Joliot-Curie obtuvieron los primeros nucleidos radiactivos artificiales bombardeando boro (${}^5\text{B}$) y aluminio (${}^{13}\text{Al}$) con partículas α para formar isótopos radiactivos de nitrógeno (${}^7\text{N}$) y fósforo (${}^{15}\text{P}$). Algunos isótopos de estos elementos presentes en la naturaleza son estables. Los isótopos inestables se encuentran en proporciones muy bajas. Las conclusiones a las que llegaron se basaban en la idea de que la radiactividad, hasta entonces de carácter natural, podía ser producida por el ser humano mediante el bombardeo con partículas alfa de algunos elementos químicos. Esto les valió el Premio Nobel de Química en 1935.

En 1932 James Chadwick realizó una serie de experimentos con una radiactividad especial que definió en

términos de corpúsculos, o partículas que formaban esa radiación. Esta nueva radiación no tenía carga eléctrica y poseía una masa casi idéntica a la del protón. Inicialmente se postuló que fuera resultado de la unión de un protón y un electrón formando una especie de dipolo eléctrico. Posteriores experimentos descartaron esta idea llegando a la conclusión de que era una nueva partícula procedente del núcleo a la que se llamó neutrón. Werner Heisenberg establece la teoría acerca de la estructura del núcleo atómico afirmando que está compuesto por protones y neutrones.

Los científicos Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann y descubrieron la fisión nuclear en 1938. Cuando se bombardea uranio con neutrones, algunos núcleos se dividen en dos núcleos con números atómicos menores, liberando una gran cantidad de energía. Este descubrimiento le valió a Otto Hahn el Premio Nobel de Física en 1944.

En 1941 Enrico Fermi desarrolla el primer reactor nuclear. Fue galardonado en 1938 con el Premio Nobel de Física “por sus demostraciones sobre la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por procesos de irradiación con neutrones y por sus descubrimientos sobre las reacciones nucleares debidas a los neutrones lentos”. Con sus colaboradores, bombardeó con neutrones 60 elementos, logrando obtener isótopos de 40 de ellos y la transmutación de átomos del elemento 92, uranio, en átomos de un elemento 93, neptunio, no existente en la naturaleza.

En 1942 entró en funcionamiento el reactor nuclear de Enrico Fermi CP-1, consiguiéndose la primera reacción de fisión en cadena controlada y automantenida.

Los primeros modelos atómicos consideraban básicamente tres tipos de partículas subatómicas: protones, electrones y neutrones. Más adelante el descubrimiento de la estructura interna de protones y neutrones, reveló que éstas eran partículas compuestas, pues están constituidos por quarks. Además el tratamiento cuántico usual de las interacciones entre las partículas comporta que la cohesión del átomo requiere otras partículas bosónicas como los piones, gluones o fotones. Los principales hitos en el descubrimiento de esas nuevas partículas son:

Wolfgang Pauli postuló en 1931 la existencia del neutrino (leptón) para explicar la aparente pérdida de la conservación de la cantidad de movimiento que se daba en la desintegración beta. Enrico Fermi fue quien inventó el nombre. La partícula no fue descubierta hasta 1956.

Fue Hideki Yukawa quién postuló la existencia de los piones para explicar la fuerza fuerte que unía a los nucleones en el interior del núcleo. El muón se descubrió en 1936, pensándose inicialmente de forma errónea que era un pión. En la década de los 50 se descubrió el primer kaón entre los rayos cósmicos.

El desarrollo de nuevos aceleradores de partículas y detectores de partículas en esa década de los 50 llevó al descubrimiento de un gran número de hadrones.

Junto con los hadrones compuestos aparecieron series de partículas que parecían duplicar las funciones y características de partículas más pequeñas. Así se descubrió otro “electrón pesado”, además del muón, el tauón, (leptones) así como diversas series de quarks pesados. Ninguna de las partículas de estas series más pesadas parece formar parte de los átomos de la materia ordinaria.

La clasificación de esos hadrones a través del modelo de quarks en 1961 fue el comienzo de la edad de oro de la física moderna de partículas, que culminó en la completitud de la teoría unificada llamada el modelo estándar en la década de los 70.

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 20 Estados miembros, entre los que se encuentra España, los cuales comparten la financiación y la toma de decisiones en la organización

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. El CERN cuenta con una serie de aceleradores de partículas. Se espera en un futuro descubrir en este laboratorio el bosón de Higgs, así como confirmar o desestimar las últimas teorías de partículas.

Historia de la protección radiológica

Apenas descubiertos los rayos X y la radiactividad, su uso se generalizó en los hospitales y laboratorios del mundo entero. A comienzos del siglo XX los tubos de rayos X se producían masivamente y se distribuían a todos los países. Por tratarse de fenómenos recién descubiertos, cuya naturaleza ni siquiera se entendía totalmente, no se tomaban precauciones y fueron muchos los que sufrieron los efectos negativos de una exposición excesiva e incontrolada. Las personas más expuestas a estas nuevas formas de radiación fueron los médicos radiólogos que utilizaban los rayos X y los científicos que manipulaban material radiactivo.

Existen muchísimas anécdotas, la mayoría con un desenlace trágico, que ilustran las consecuencias de la ignorancia de los posibles efectos biológicos de la radiación. El ayudante de laboratorio del inventor de las técnicas fluoroscópicas perdió todo su cabello, sufrió quemaduras, ulceración y finalmente falleció a causa de su exposición continua a altas intensidades de rayos X. Irene Curie, hija de Pierre y Marie, quien descubriera, junto con Frederic Joliot, la radiactividad artificial, murió a mediados del siglo XX aquejada de leucemia, seguramente un efecto biológico tardío de la radiación recibida durante su juventud.

Debido a que fueron precisamente los médicos y los físicos las primeras víctimas del exceso de radiación ionizante, rápidamente se tomó conciencia del problema dentro de la comunidad científica. En 1920 se erigió en Hamburgo un monumento que recuerda a más de 100 pioneros radiólogos fallecidos a causa de la exposición excesiva durante el ejercicio de su profesión. El primer estudio para establecer niveles aceptables de irradiación fue hecho por la Sociedad Americana de Rayos Roentgen y la Sociedad Americana del Radio en 1922, y las primeras unidades de dosis de radiación se definieron con base en la exposición que llegaba a provocar quemaduras en la piel del paciente.

En 1928, durante el Congreso Internacional de Radiología celebrado en Londres, ocurren dos hechos trascendentales para la evolución de la radiología: se define al *Roentgen* como la unidad física que mide la cantidad de radiación producida por un tubo de rayos X duran-

te su operación, y se establece la Comisión Internacional de Protección Radiológica, conocida como (ICRP) que 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.

También en 1928, a la vista de la necesidad de cuantificar la exposición a la radiación, se crea la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (CIUMR)

Otros organismos relacionados con la protección radiológica:

- El Comité Científico de Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), creado en 1955 en el seno de la ONU con 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 la Energía Atómica (OIEA), creado en 1957, que forma parte 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.

En 1966 la ICRP revisó los límites de dosis a los trabajadores expuestos y la fijó en 50 mSv anuales. En 1970

la ICRP formuló el principio ALARA, As Low As Reasonably Achievable” (dosis tan baja como sea razonablemente posible). En 1977 la ICRP adoptó como unidad de dosis el sievert.

En 1979, la Conferencia general sobre pesos y medidas adoptó, como unidades del sistema internacional: sievert (Sv) para la dosis equivalente, el gray (Gy) para la dosis absorbida y el becquerelio (Bq) para la actividad.

En 1980 el Consejo de Comunidades Europeas actualizó la Directiva sobre las normas básicas de seguridad para la protección sanitaria de los trabajadores expuestos y del público en general contra los riesgos de la radiación ionizante.

En 1991 la ICRP formuló nuevas recomendaciones y definió la dosis unitaria efectiva, el sievert (Sv), como la suma de las dosis absorbidas por todos los tejidos y órganos del cuerpo ponderados en función del tipo de radiación y del tejido. La dosis límite propuesta para los trabajadores expuestos es de 100 mSv en 5 años, con un límite anual de 50 mSv.

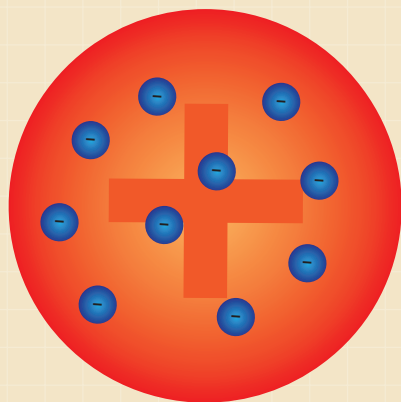
La legislación española vigente recoge, en su *Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes*, los principios recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR-ICRP).

En España, el único organismo con competencias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica es el Consejo de Seguridad Nuclear, y en lo referente exclusivamente a la protección radiológica, tiene como misión principal la protección de los trabajadores expuestos, la población y el 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 la primera mitad del siglo XX. El concepto del átomo como una esfera de materia positiva donde se distribuyen uniformemente los electrones (modelo pastel con pasas), lo propuso Sir Joseph Thompson en 1897. En 1913, Niels Bohr y Walter Bothe supusieron que los electrones giraban alrededor de un núcleo en órbitas (modelo de un sistema planetario). Mas tarde, en 1926 Schrödinger abandona la concepción de los electrones como esferas diminutas con carga que giran en torno al núcleo, y describe los electrones por medio de una función de onda, el cuadrado de la cual representa la *probabilidad de presencia* en una región delimitada del espacio llamado orbital (modelo ondulatorio de Schrödinger).



Modelo atómico de Thomson

Por lo tanto en el átomo distinguimos dos partes: el núcleo y la corteza

- El núcleo es la parte central del átomo y contiene partículas con carga positiva, los protones, y partículas que no poseen carga eléctrica, es decir son neutras, los neutrones. La masa de un protón es aproximadamente igual a la de un neutrón. Lo que caracteriza a cada elemento y lo distingue de los demás es el número de protones que hay en el

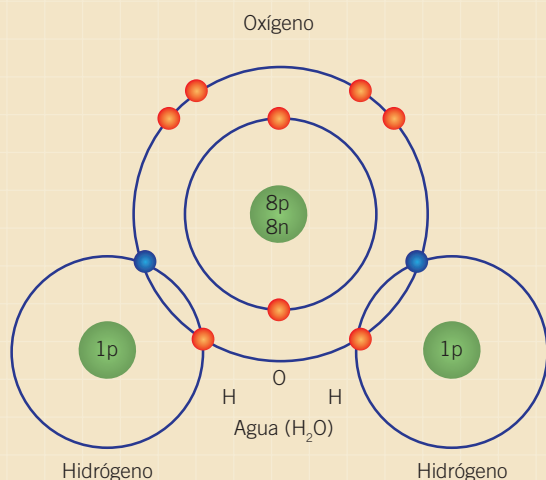
núcleo. Se conoce como *número atómico* y se representa con la letra Z .

- La corteza es la parte exterior del átomo. En ella se encuentran los electrones, con carga negativa. Éstos, ordenados en distintos niveles, giran alrededor del núcleo. La masa de un electrón es unas 2.000 veces menor que la de un protón.

Sabemos que normalmente la materia no está cargada eléctricamente por lo que los átomos deben ser eléctricamente neutros. Para conseguir este equilibrio, el número de protones tienen que ser igual al de electrones. Por consiguiente el número atómico también coincide con el número de electrones.

Por ejemplo, el núcleo del oxígeno tiene ocho protones equilibrados con sus ocho electrones orbitales. Este último total está formado por dos electrones en una órbita interna y seis en otra externa que puede contener hasta ocho electrones. El átomo de hidrógeno tiene un protón en su núcleo y solamente un electrón. Por consiguiente, dos átomos de hidrógeno pueden aportar dos electrones orbitales que si se combinan con los seis del oxígeno sumarán ocho, cifra que sabemos que es estable. Ésta es la explicación de la reacción química entre dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno que da lugar a la molécula de agua. La energía química liberada en esta reacción es la fuente de calor liberado en la combustión del hidrógeno en el aire.

La masa del núcleo está compuesta por el número total de protones y neutrones. La suma del número de protones y el número de neutrones de un átomo recibe el nombre de *número másico* y se representa con la letra A . Aunque todos los átomos de un mismo elemento se caracterizan por tener el mismo número atómico, pueden tener distinto número de neutrones. Llamamos isótopos a las formas atómicas de un mismo elemento que se diferencian en su número másico o sea en el número de neutrones.

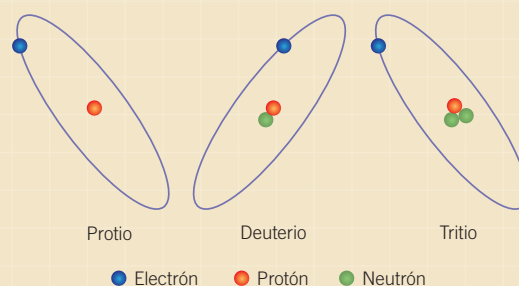


Molécula de agua

El protio es el nombre asignado al isótopo más simple, del elemento más abundante del universo, el hidrógeno. Esta variedad de hidrógeno tiene su núcleo constituido por una única partícula, el protón. La abundancia natural del protio es del 99,98% esto significa que, aproximadamente, de cada 10.000 átomos de hidrógeno, 9.998 serán de protio. Si ahora añadimos un neutrón al núcleo del protio estaremos ante el núcleo de hidrógeno de masa atómica 2, que es químicamente igual al protio y este isótopo se denomina deuterio. El agua hecha con este tipo de átomo de hidrógeno, que tiene el doble de la masa que el protio, se llama agua pesada y su densidad es superior a la del agua ordinaria.

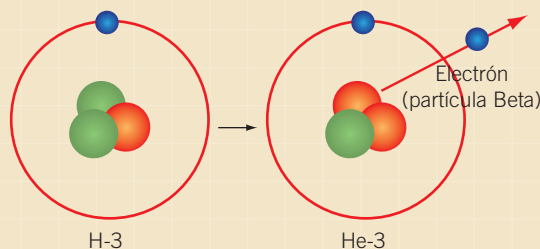
Podemos construir un núcleo aún más pesado añadiendo otro neutrón. El resultado sigue siendo un núcleo de hidrógeno que es su tercer isótopo, el tritio. Los diversos isótopos de un elemento se diferencian por su masa atómica, por lo que podemos referirnos a los tres isótopos del hidrógeno como hidrógeno-1 (protio), hidrógeno-2 (deuterio) e hidrógeno-3 (tritio).

En el caso del hidrógeno-3, el “proceso de construcción atómica” ha ido demasiado lejos, la estructura contiene demasiados ladrillos; este isótopo del hidrógeno tiene demasiados neutrones y es inestable. En los casos en que la relación entre protones y neutrones esté desequilibrada respecto a los valores que confieren estabilidad, espontáneamente los núcleos tienden a alterar su composición y a emitir partículas, hasta alcanzar una configuración estable, fenómeno conocido como *radiactividad*.



Los tres isótopos del hidrógeno

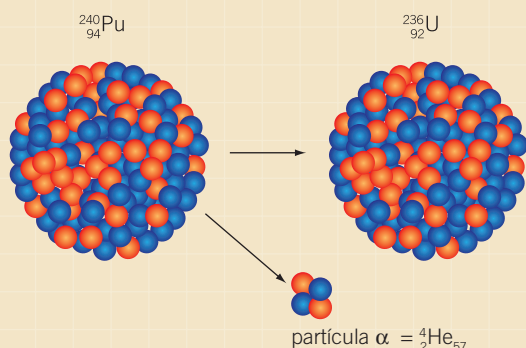
El núcleo del tritio inestable tiene que recuperar su estabilidad haciendo que uno de los dos neutrones emita un electrón y se convierte en un protón. Este electrón escapa del núcleo a alta velocidad y lo detectamos en forma de partícula beta.



Emisión de una partícula beta

Éste es el proceso que descubrió Henri Becquerel en 1896 y al que se denomina *desintegración radiactiva*. Este proceso libera energía, por lo que puede estar acompañado de una descarga de radiación electromagnética, y a la vez crea un nuevo elemento, en este caso el helio ($Z=2$). La descarga de energía es el fotón o los rayos gamma, que es la forma más penetrante de la radiación electromagnética.

La idea de que los elementos son inestables y tienen demasiados neutrones se aplica a elementos muy grandes tales como el uranio o el plutonio. El plutonio es el *elemento* con $Z = 94$ y tiene un isótopo con 146 neutrones que se llama plutonio 240. El plutonio 240 es inestable pero no emite una partícula beta porque puede perder dos neutrones emitiendo una partícula alfa que contiene dos neutrones y dos protones. Esta partícula es el núcleo de helio, que puede captar dos electrones para convertirse en un átomo neutro de helio 4. La partícula alfa que se emite tiene suficiente energía para convertirse en radiación ionizante.



Desintegración del plutonio-240

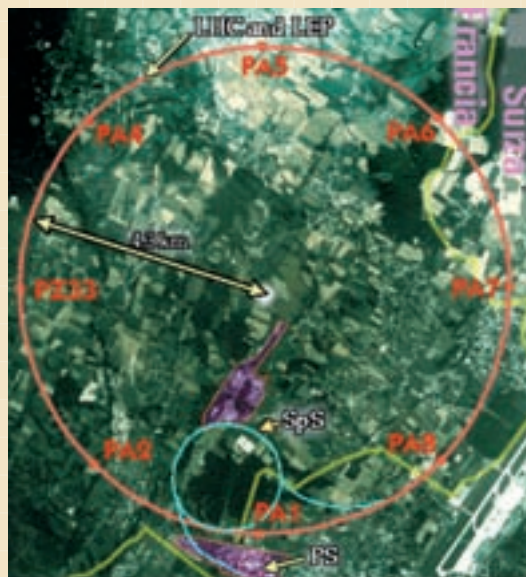
En 1903, Sir Ernest Rutherford descubrió la desintegración radiactiva del uranio y observó que constituía el principio de una serie de elementos radiactivos responsables de la radiación emitida por minerales de uranio tales como la pechblenda. Se descubrió que el radio, aislado por primera vez en 1898 por Pierre Curie y Marie (Sklodowska) Curie, era miembro de esta familia radiactiva. Esta familia contribuye sustancialmente a la radiactividad natural de la Tierra.

En 1934, Frédéric Joliot e Irene Curie experimentaron, utilizando un haz de neutrones, para crear radiactividad artificial. Descubrieron que el aluminio absorbía un neutrón y se convertía o transformaba en fósforo 32. En 1939, Hans von Halban, Frédéric Joliot y Lew Kowarski bombardearon uranio con haces de electrones y el núcleo se desintegró, con lo que se descubrió el famoso proceso de *fisión*. Hoy sabemos que la desintegración del uranio 235 por efecto del bombardeo de neutrones es en realidad una división del núcleo en dos fragmentos que constituyen núcleos más ligeros, por ejemplo el criptón 89 y el bario 144. La reacción de fisión comienza en un elemento con demasiados neutrones, por lo que no constituye ninguna sorpresa que además de los dos *núclidos*, se desprendan varios neutrones. La enorme cantidad de energía o calor liberada en esta reacción proviene del núcleo. Si uno de estos electrones es absorbido por otro núcleo de uranio 235, el proceso puede continuar en forma de *reacción en cadena*. Éste es el principio del funcionamiento de un reactor nuclear. La mayor parte de estos fragmentos de la fisión son radiactivos y constituyen los productos de desecho o “cenizas” producidos al consumir uranio en un reactor.

Enrico Fermi hizo funcionar en 1942 el primer reactor nuclear obra del ser humano. Pero no fue el primero en la superficie de la Tierra. Hace alrededor de 1.700 millones de años, el primer reactor nuclear funcionó de forma espontánea en la mina de uranio de Oklo, en Gabón (África); se puede demostrar que actualmente este depósito contiene una proporción de uranio 235 inferior a lo normal en la Tierra.

CERN

La Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) es el laboratorio de investigación de física de partículas más grande del mundo. Cuenta con una superficie de 6 km² situados a ambos lados de la frontera franco-suiza y con 34 km de túneles y galerías a más de 100 metros de profundidad. En este laboratorio fueron descubiertos los quarks y otras partículas subatómicas (bosones W y Z). Muchas de estas partículas solo existieron durante la formación del universo. Se utilizan aceleradores de partículas y detectores de partículas. Los aceleradores de partículas aumentan la energía de las partículas antes de hacerlas chocar entre ellas. Los detectores de partículas observan los resultados de estas colisiones y registran lo que ocurre.



En el nuevo acelerador protón-protón LHC (gran colisionador de hadrones,) se buscarán los bosones de Higgs y nuevas partículas y fuerzas fundamentales.

3

Espectro de ondas electromagnéticas: 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: 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).

Cuando la longitud de onda 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.



Onda transversal

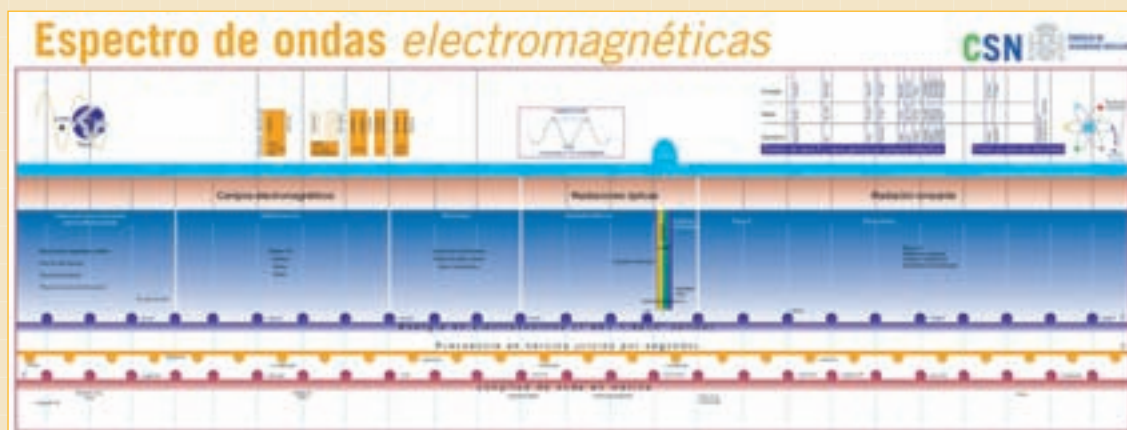
La longitud de onda se mide en unidades de longitud (km, m, mm...) y es la distancia que hay entre dos crestas.

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 $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ julios).

Ordenando las radiaciones desde las de menor a las de mayor energía se obtiene lo que se denomina el **espectro electromagnético**. 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: los campos de menos frecuencia que la radiofrecuencia, la radiofre-



Espectro de ondas electromagnéticas

cuencia, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible y la radiación ultravioleta.

A continuación destacaremos la procedencia 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.

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.

Los efectos principales de esta radiación sobre el cuerpo humano son: produce 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, pueden causarse 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 *foto biológica*. 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 enve-

jecimiento prematuro, cáncer de piel y, en el caso de los ojos, amarilleamiento 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 ultravioletas para 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.

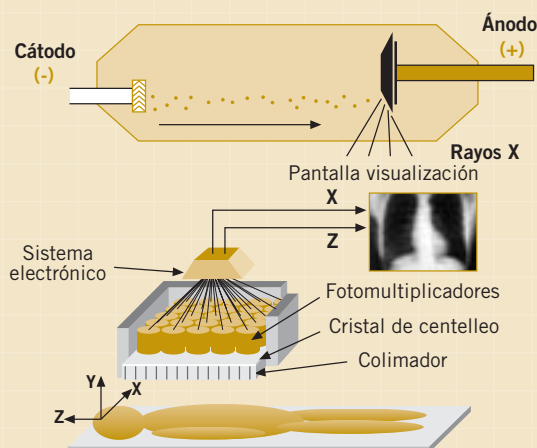
A continuación destacaremos la procedencia y ciertas propiedades de este tipo de radiaciones:

- **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, etc.

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.



- **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 al 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 de la tierra. 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.

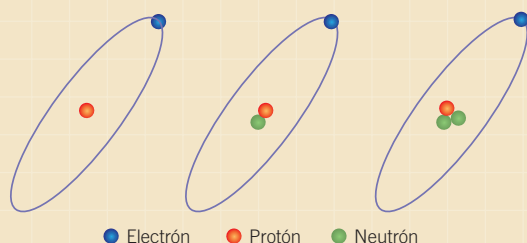
4

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. 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.

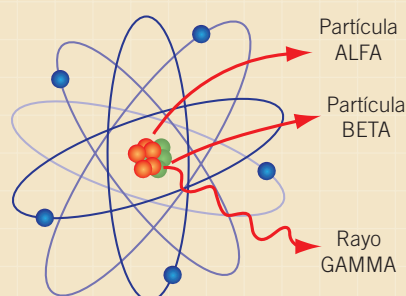


Protones y electrones se atraen entre sí por fuerzas físicas

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/o gamma), y este fenómeno se conoce con el nombre de radiactividad, descubierta por Becquerel en 1896.



Actividad

Es el número de desintegraciones que tienen lugar cada segundo en una cantidad dada de material radiactivo. Se mide en unidades denominadas *becquerelio (Bq)*, en honor a Henri Becquerel. Un becquerelio 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.

Período de semidesintegración

Cada elemento radiactivo tiene su propia vida. Algunos isótopos radiactivos sólo son activos durante períodos 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,

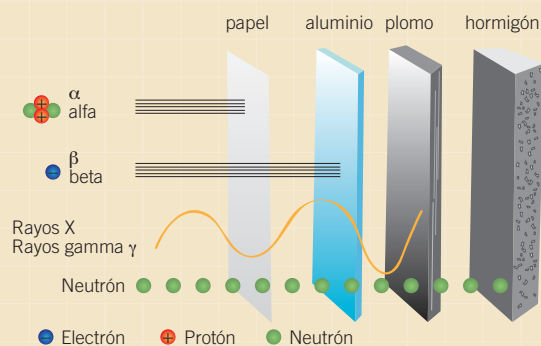
los elementos inestables se transforman en otros, para terminar convirtiéndose en elementos estables. De este modo, el uranio-235 se transforma en radón, antes de convertirse en plomo, que ya es estable. Cada paso se produce a un ritmo determinado.

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 radionucléido se va reduciendo en semidesintegraciones sucesivas, a 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, etc. 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 sólo 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 éstas. 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.



- **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 sólo 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 sólo puede detenerlos una gruesa barrera de hormigón, agua o parafina, o ser absorbidas con venenos neutrónicos (cadmio, boro y gadolino).

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. Ésta 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 ión), 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 éste. 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.
- **La radiación X y γ** son radiaciones electromagnéticas muy penetrantes. Al interactuar con la materia da lugar a electrones secundarios que provocan excitación e ionización en el medio que atraviesan (por eso son radiaciones indirectamente ionizantes).

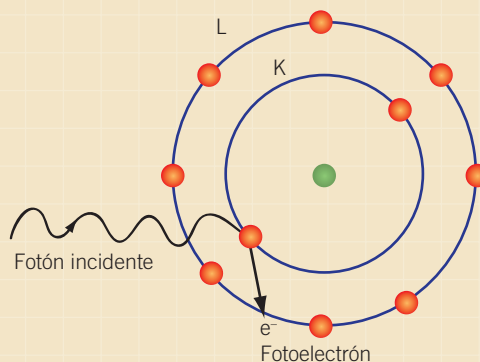
El proceso de cesión de energía (atenuación) cumple una ley exponencial:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

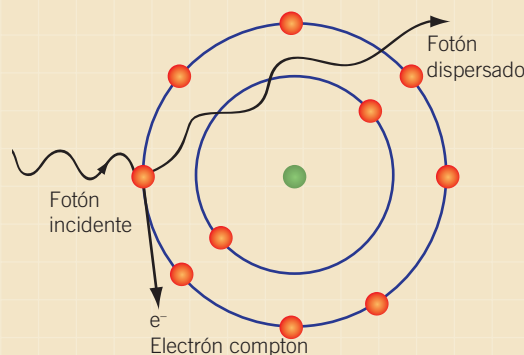
donde x = espesor; μ = coeficiente atenuación lineal.

Este tipo de radiación interactúa directamente con la materia mediante alguno de los procesos siguientes:

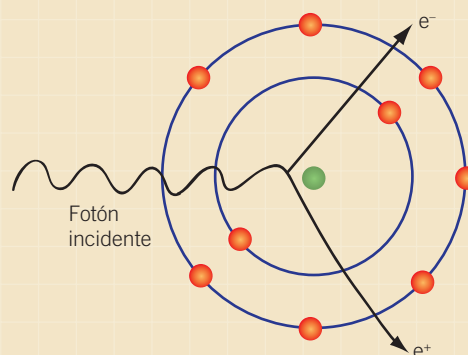
- **Efecto fotoeléctrico.** En este proceso el fotón queda completamente absorbido transfiriendo su energía a un electrón que escapa del átomo al que estaba ligado. La vacante se ocupa con otro electrón del mismo átomo emitiéndose radiación electromagnética característica (rayos X característicos).



- **Efecto Compton.** El fotón sólo cede parte de su energía al electrón con el que interacciona y se desvía de su trayectoria inicial (se dispersa). La energía cedida varía dependiendo del ángulo de dispersión.



- **Formación de pares.** El fotón incidente se transforma en un electrón y un positrón. Para ello, este fotón debe superar la energía de unión (1,02 MeV).

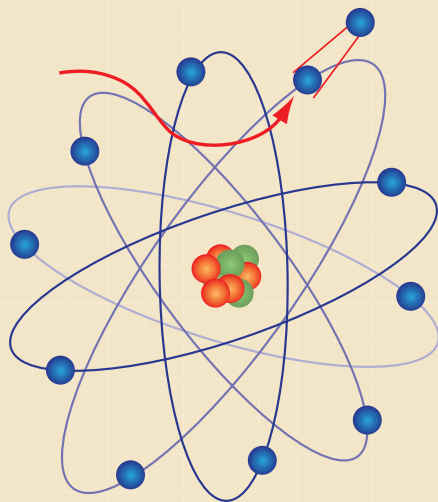


La probabilidad de que se produzca un efecto u otro depende:

- 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 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,α), 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.



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, μ Sv).

- **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 sólo provoca lesiones en sitios concretos, de forma que el tejido puede soportarlo razonablemente bien e inclu-

so 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 R. 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

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 ésta.

Tipo y rango de energía	Factor de ponderación de la radiación
Fotones de todas las energías (alfa)	1
Electrones de todas las energías	1
Neutrones (según energía)	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.

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.

Magnitud	Fórmula	Símbolo	Unidad
Actividad		A	Becquerelio (Bq)
Dosis absorbida		D	Gray (Gy)
Dosis equivalente	$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$	H	Sievert (Sv)
Dosis efectiva	$E = \sum T W_T \cdot H_T$	DE	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: aspectos legales

Biología humana

El efecto de la exposición a la radiación 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 sólo 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, ésta 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, no muere, pero sus funciones quedan 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 deterministas de la radiación ionizante

El daño causado a un tejido por la ionización es proporcional a la cantidad de energía de radiación absorbida, cantidad que recibe el nombre de dosis absorbida, y se mide en Gy. 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 actúa como muchos otros agentes tóxicos, cuyas consecuencias se manifiestan sólo 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 ésta.

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: una persona expuesta a dosis superiores a los 2 Gy (Sv)⁽¹⁾ 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.

Efectos estocásticos de la exposición a radiaciones ionizantes

La inducción de cáncer y los efectos hereditarios son 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 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 la hipótesis de que se pueden producir a cualquier nivel de dosis y no existe 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, *As Low As Reasonably Achievable*). Los efectos estocásticos inducidos por la radiación (principalmente cánceres y efectos hereditarios) no se diferencian de los producidos

por causas naturales u otros factores. Las anomalías que puede producir la radiación no son específicas.

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 sería sumamente bajo, pero existe, y aumenta con las sucesivas exploraciones radiológicas, ya que las dosis son acumulativas de por vida. Por ello, todas las exploraciones deben estar justificadas. Aquellas exploraciones que no puedan justificarse estarán prohibidas (Real Decreto 815/2001, de 3 de julio, de las radiaciones ionizantes, sobre justificación del uso 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. Por ejemplo:

En una persona adulta:

- Una dosis de 1.000 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 1/1.000 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.

⁽¹⁾ Se cumple la equivalencia 1 Sv = 1 Gy para las radiaciones electromagnéticas (rayos X y gamma) y los electrones, pero para otras radiaciones debe utilizarse un factor corrector: 20 para la radiación alfa, de 1 a 20 para neutrones.

Una aproximación útil de valoración del riesgo por exposición a la radiación ionizante en una mujer embarazada consiste en indicar la probabilidad de no tener un hijo con malformaciones o cáncer y ver cómo esta probabilidad se modifica por la exposición a la radiación, tal y como se indica en la tabla adjunta:

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

Fuente: Publicación nº 84. ICRP

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 la infancia, es del 0,6%.

Por otro lado, la dosis media anual que recibe la población a causa de fuentes naturales es fundamentalmente debida a radon-222 y es de 2,4 mSv, fluctuando este valor en función del lugar en que se vive. La dosis recibida a causa de fuentes artificiales es mucho menor, alrededor de 1 mSv.

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 con 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 60 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, el 13 de mayo de 1996, se aprobó la Directiva 96/29/EURATOM, del Consejo, por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección radiológica de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las 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.

La legislación española vigente recoge, en su Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, los principios recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR-ICRP).

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.

En el caso de España, la trasposición de la Directiva 96/29 EURATOM se recoge en el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (Real Decreto 783/2001, de 6 de Julio). Mediante este Real Decreto se realiza una transposición de dicha Directiva, aunque no íntegra ya que parte de ella fue objeto de transposición, entre otros, en el Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas.

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, el proceso de la salida del mineral de la “mina” para la fabricación del combustible y su gestión como residuo radiactivo.

Se definen dos tipos de ciclo: ciclo abierto y ciclo cerrado.

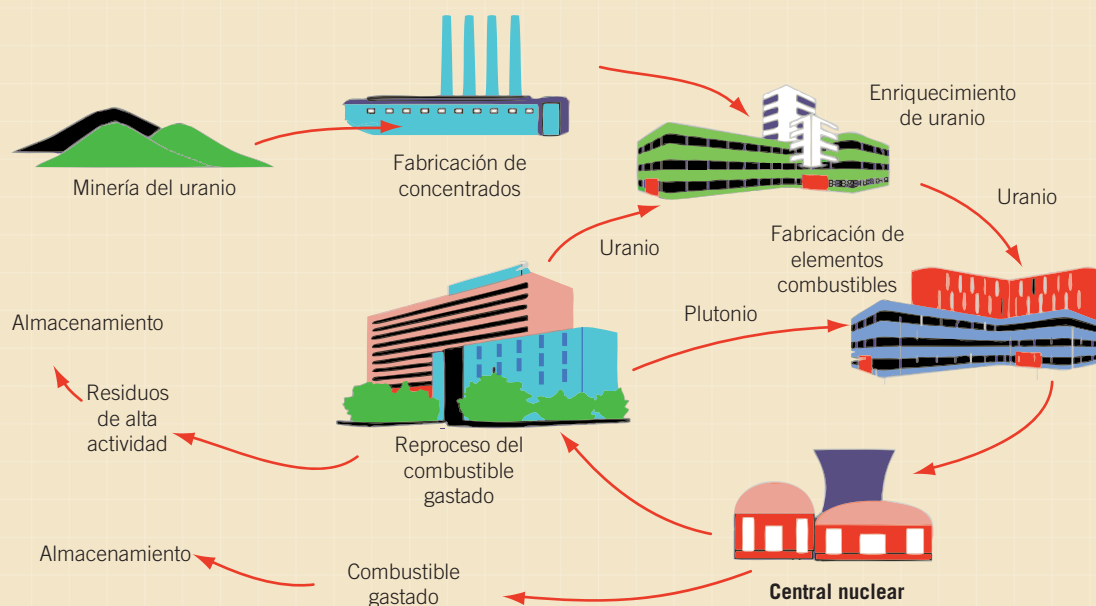
Si el combustible irradiado no se reprocesa es considerado en su totalidad como residuo radiactivo, se denomina ciclo abierto, con lo que no se completa el denominado ciclo del combustible nuclear.

En el caso del uranio, el ciclo cerrado incluye la minería, la producción de concentrados de uranio, el enrique-

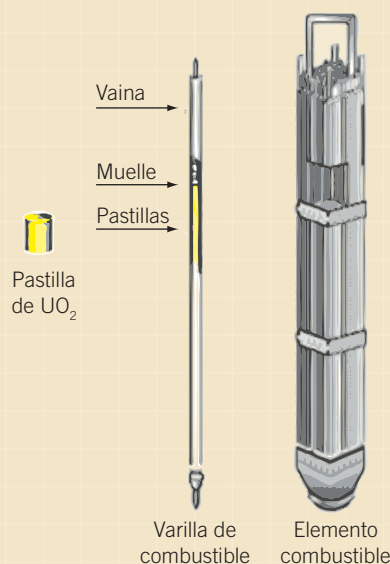
cimiento (si procede), la fabricación de los elementos combustibles, su empleo en el reactor y el reprocesado de los elementos combustibles irradiados, para recuperar el uranio remanente y el plutonio producido, separando ambos de los residuos radiactivos de alta actividad que hay que evacuar definitivamente.

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 U_3O_8 (llamado torta amarilla o *yellow cake*).



- *3ª etapa. Conversión a UF_6 y enriquecimiento.* El concentrado de uranio una vez preparado, y mediante una serie de reacciones químicas (reducción, hidrofluoración, fluoración y destilación), es transformado a UF_6 (hexafluoruro de uranio). Éste 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, pero 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. 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.
- *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, éste 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.



Composición de un elemento combustible

Transporte

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 más de las nueve clases de mercancías peligrosas y se la identifica como *clase 7*.

La seguridad en el transporte descansa 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.

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. El combustible se emplea para producir la reacción en cadena por la que los neutrones liberados por una reacción de fisión desencadenan otra semejante.

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. 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.

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 ésta carece de barras de control y de moderadores.

El calor generado por el reactor debe ser eliminado convenientemente, no sólo para suministrar vapor a las turbinas, sino también para mantener el combustible a una temperatura adecuada. Para ello hay que añadir

Tipo de reactor	Combustible	Moderador	Refrigerante	Notas
Reactor de agua a presión (PWR)	U enriquecido	Agua ligera (H ₂ O)	Agua ligera (H ₂ O)	Circuito de agua secundaria para producir calor
Reactor de agua a ebullición (BWR)	U enriquecido	Agua ligera (H ₂ O)	Agua ligera (H ₂ O)	Se deja que el refrigerante hierva y produzca vapor
Reactor refrigerado por gas	U natural	Grafito	Dióxido de Carbono CO ₂	El CO ₂ calienta un circuito de agua separado para producir vapor
Reactor avanzado refrigerado por gas (AGR)	U levemente enriquecido	Grafito	Dióxido de Carbono CO ₂	
Reactor de agua pesada CANDU	U natural	Agua pesada (D ₂ O)	Agua pesada (D ₂ O)	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

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, ésta puede realizar dos funciones: la de moderador y la de refrigerante.

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 anterior tabla se muestran varios ejemplos de reactores.

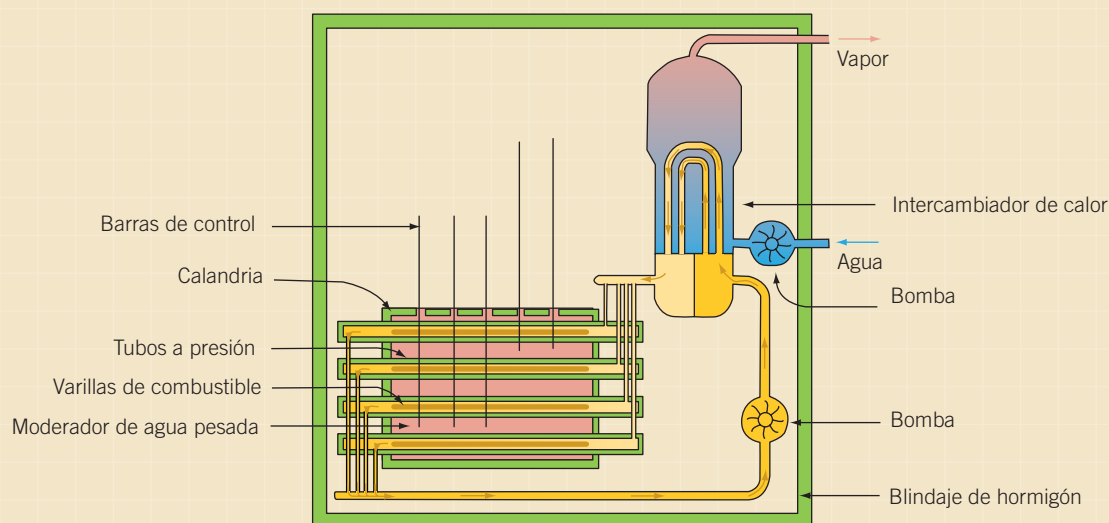
En la unidad 7 del nivel I y 6 del nivel II, hemos repasado el funcionamiento de las centrales nucleares operativas en España (centrales de agua a presión y de agua a ebullición), a continuación vamos a ver otros tipos de reactores.

- CANDU, *Canada Deuterium Uranium* (Canadá deuterio uranio). Utilizan como moderador y refrigerante agua pesada (compuesta por dos átomos de deuterio y uno de oxígeno). Como combustible utilizan uranio natural.

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.



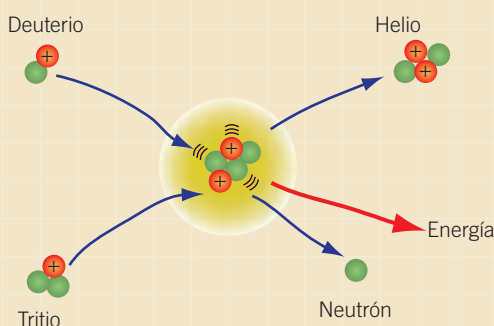
- AGR, *Advanced Gas-cooled Reactor* (reactor avanzado refrigerado por gas). Usa uranio levemente enriquecido como combustible. Como refrigerante utiliza CO_2 y como moderador grafito. Las barras de control penetran en el moderador de grafito, y existe un sistema secundario de parada del reactor que 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 Chernobil 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 sólo 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. Por ejemplo: el AP1000 que 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 se fabrica de forma modular reduciendo el tiempo de construcción y por tanto los costes.

El ITER

El ITER es un experimento científico a gran escala que intenta demostrar que es posible producir de una forma comercial energía eléctrica procedente de la fusión nuclear.

Se pretende que del ITER se obtengan 500 MW de potencia con sólo un consumo de 50 MW de potencia. 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.



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 hace que responda a la influencia de los campos magnéticos que dispone el Tokamak permaneciendo confinado dentro del plasma.

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.

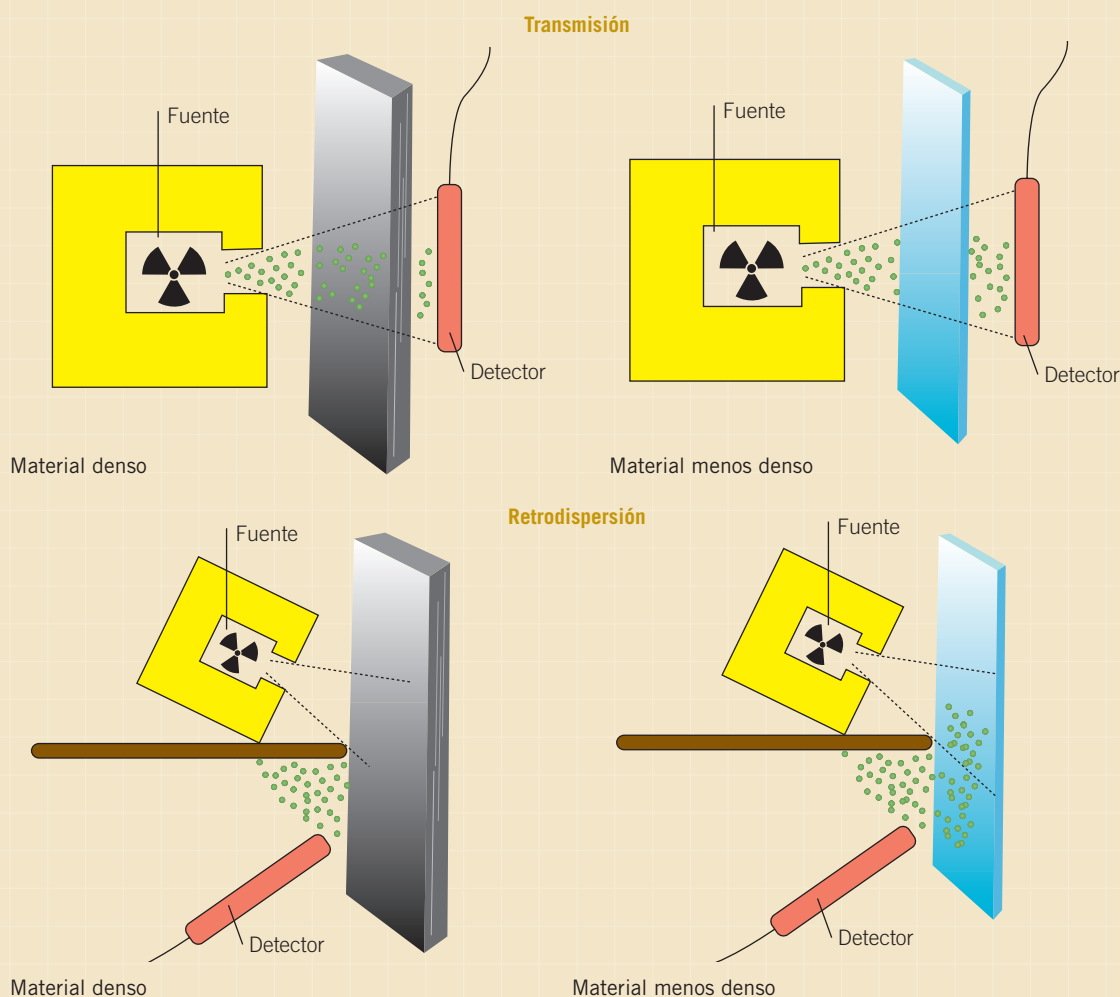
7

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 ésta 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 retrodis-

persada nos da información sobre el material. Se incluyen aquí: radiografía y gammagrafía, control de proceso (medida de niveles, espesores, densidad, gramaje, humedad...), 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.



- 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 humos, pararrayos... Se utilizan actividades muy bajas de emisores alfa y beta.
- Trazadores: utilización de isótopos radiactivos para el estudio del comportamiento de determinados mate-

riales. La técnica consiste en incorporar radionucleidos a un material para seguir su curso o comportamiento mediante la detección de la radiaciones. 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 se exponen algunas de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la industria, la agricultura y la investigación.

Isótopo radiactivo	Tipo de emisión	Periodo de semidesintegración	Aplicación
Cesio-137	β y γ	30 años	Control de procesos, irradiación (esterilización de materiales e irradiación de alimentos), medida de densidad en suelos...
Cobalto-60	β y γ	5,26 años	Gammagrafía industrial, irradiación (esterilización de materiales, irradiación de alimentos), control de procesos
Iridio-192	β y γ	74 días	Gammagrafía industrial
Americio-241/Berilio	α , β y γ neutrones	458 años- 53,3 días	Medida de humedad
Carbono-14	β	5.730 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 analítica
Níquel-63	β	125 años	Técnicas analíticas
Americio-241	α y γ	460 años	Detectores de humo, eliminación de electricidad estática y control de procesos.

Sistemas radiactivos de control y medida

Control de procesos

Son equipos situados en línea de proceso de fabricación. La radiación al interactuar 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

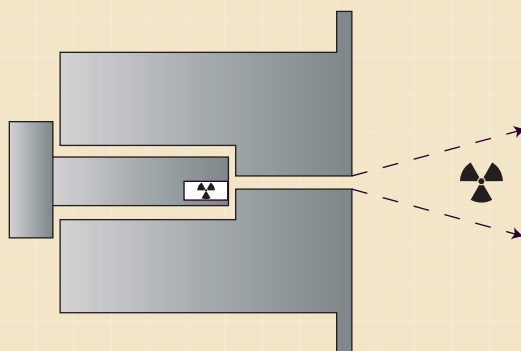
en la línea de proceso para medida en continuo de nivel, densidad, espesor, gramaje o análisis de materiales.

Se utilizan en gran variedad de industrias, como: embotelladoras, acerías, cementeras, fábricas de plásticos, de papel, de productos textiles, tabacaleras, petroquímicas, madereras, o centrales térmicas.

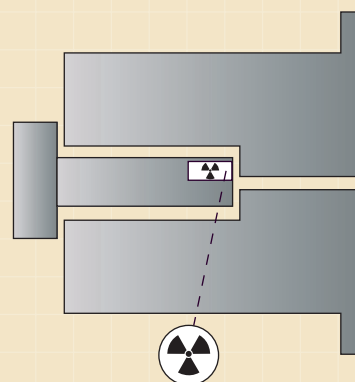
La radiación gamma es la más utilizada en el control de la fabricación de láminas metálicas, debido a su alto poder de penetración. La radiación beta, con menor poder de penetración, es habitual en la industria del papel y el plástico.

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, hormigón...

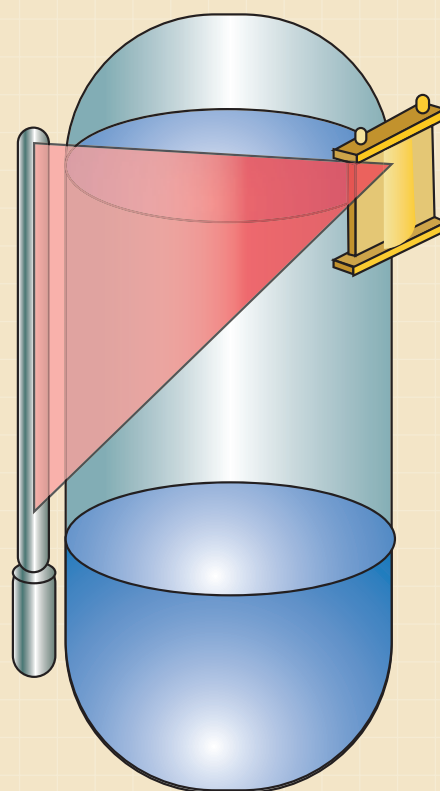
Cabezal radiactivo



Posición de medida



Posición de seguridad



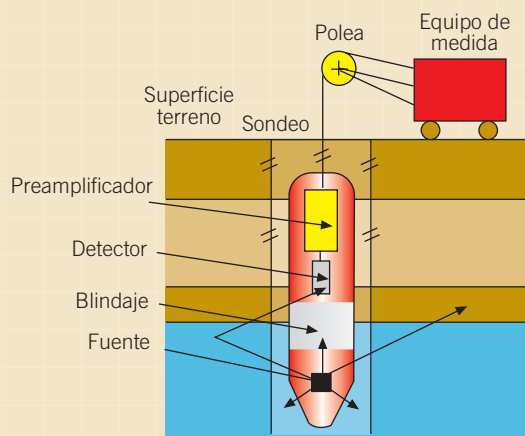
Medidor de nivel

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

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.

Para medir la densidad del terreno se utiliza una fuente gamma como el Cs-137, y se mide en el detector la radiación que 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 Am-241/Be. Estos neutrones se termalizan (reducen su energía) al interactuar con átomos de hidrógeno del agua.

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 y gammagrafía industrial

La radiografía y gammagrafía industrial se utilizan 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.

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 radia-

ción 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 producirse rayos X de mayor energía por medio de aceleradores. 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 y gammagrafía 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 (Co-60 y Cs-137), o
- 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)”.

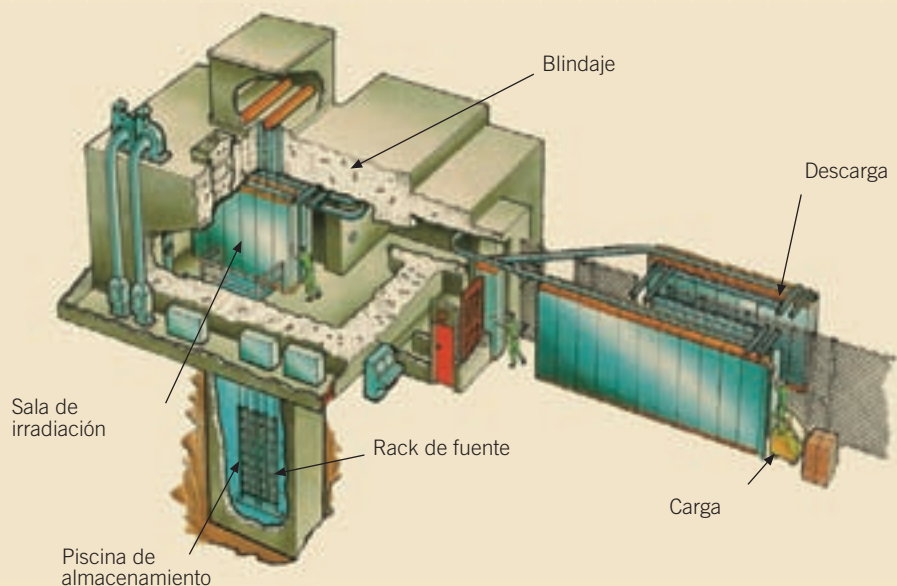
La radiación gamma también se utiliza para *el tratamiento de alimentos y mejorar su conservación*. Estos alimentos irradiados no se convierten en radiactivos, de modo que el consumidor no está expuesto a ninguna radiación. En este caso la irradiación viene de una fuen-

te 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.

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, se puede modificar el



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

tiempo de maduración para obtener plantas de maduración más tardía o temprana, aumentos en la resistencia a enfermedades evitando de esta manera la utilización de productos químicos contra plagas, aumento de rendimientos de cultivos, mejora de 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 puede 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 sólo 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 éste 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 (autoradiografía, contaje de centelleo, etc.) en función del campo de radiación que producen el o los radioisótopos que la componen.

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 radioi-

sótopos 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*.

Radioisótopos más usados en investigación

Radionucleido	Tipo de emisión	Periodo de semidesintegración
Tritio-3	β	12,3 años
Carbono-14	β	5.730 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. Marcan-

do 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, edificios oficiales...

Tenemos sistemas de inspección de grandes contenedores, como los que se emplean en puertos para inspeccionar los contenedores que transportan los camiones, 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...



Detectores de contenedores de camiones

Detectores de humo

Son dispositivos usados en sistemas de protección contra incendios. Su diseño incorpora una cámara de ionización, una fuente radiactiva (Am-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.



Detector de humo

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: Po-210 y Am-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, vidrio, etc.; 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 éstos 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. Asimismo, 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 más de las nueve clases de mercancías peligrosas y se la identifica como *clase 7*.

La seguridad en el transporte descansa 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.

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.

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 éstos 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 las autoridades competentes.

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 incluye las categorías siguientes:

- **Residuos de muy baja actividad de vida corta.** Contienen una cantidad muy baja de radionucleidos, del orden de 10 a 100 Bq/g. Se estima que en España será necesario gestionar 120.000 m³ 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 entre 1.000 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 35.000 m³ de este tipo de residuos. 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.

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. Ocasionalmente, también pueden generarse residuos radiactivos en otros ámbitos, como consecuencia de actividades específicas.

De acuerdo con el *VI Plan General de Residuos Radiactivos*, el origen de los residuos que se generan actualmen-

te, así como los que potencialmente podrían generarse en el futuro, son fundamentalmente los siguientes:

- La operación y el futuro desmantelamiento de las centrales nucleares.
- La operación y el futuro desmantelamiento de la Fábrica de Elementos Combustibles.
- Las aplicaciones de los radioisótopos en medicina, industria, agricultura e investigación.

Las cantidades totales de residuos radiactivos que será necesario gestionar y su distribución porcentual según su origen son las siguientes:

- Residuos de baja y media actividad (RBMA) y residuos de muy baja actividad (RBBA): 176.000 m³.

Desmantelamiento de centrales nucleares	72%
Operación de las centrales nucleares	20%
Aplicaciones médicas, industriales, etc.	3%
Fabricación de elementos combustibles	1%
Otros	4%

- Combustible gastado de las centrales nucleares y residuos de alta actividad (RAA): 12.800 m³.

Combustible gastado de las centrales nucleares	79%
Otros residuos	20%
Vidrios generados en el reprocesado de combustible gastado (fuera de España)	1%

En la tabla siguiente 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 aún pendientes de decisión.

Actividad inicial	Vida media	
	Corta < 30 años	Larga > 30 años
Muy baja actividad	Almacenamiento El Cabril	Estabilización <i>in situ</i> en emplazamientos mineros e industriales
Baja y media actividad	Almacenamiento El Cabril	En estudio almacén temporal centralizado (ATC)
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 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.

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.

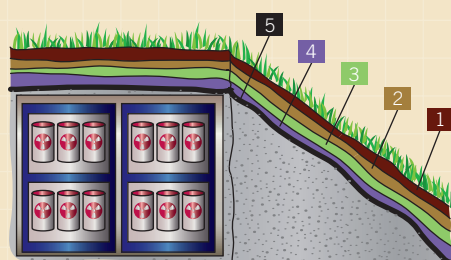
El tiempo necesario depende del tipo de residuo. Los residuos de muy baja actividad de vida corta necesitan ser controlados durante algunas decenas de años. Los residuos radiactivos de baja y media actividad y vida corta necesitan algunos siglos y los residuos de alta actividad miles de años.

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 (<30 años). La situa-

ción 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.



Esquema instalación de almacenamiento en la superficie.

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1 Capa filtrante | 4 Arcilla, impermeable |
| 2 Escollera | 5 Cobertura |
| 3 Arena y grava | |

- **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:

- 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 preparadas 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 garantizan sus propiedades idóneas para la retención de los posibles radionucleidos que pudieran atravesar las dos primeras barreras.



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 el almacenamiento definitivo de los residuos de baja y media actividad en España está en funcionamiento, desde 1992, la instalación superficial de El Cabril, en 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 2 metros de lado, inmovilizándolos interiormente con cemento. Los contenedores, se

conducen posteriormente a su destino definitivo, que consiste en celdas de hormigón armado con capacidad para 320 contenedores.

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. La instalación de El Cabril se ha ampliado recientemente con la construcción de celdas de almacenamiento específicas para los residuos de muy baja actividad.



Centro de almacenamiento en superficie de El Cabril. Hornachuelos (Córdoba)

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.

En la actualidad 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 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).

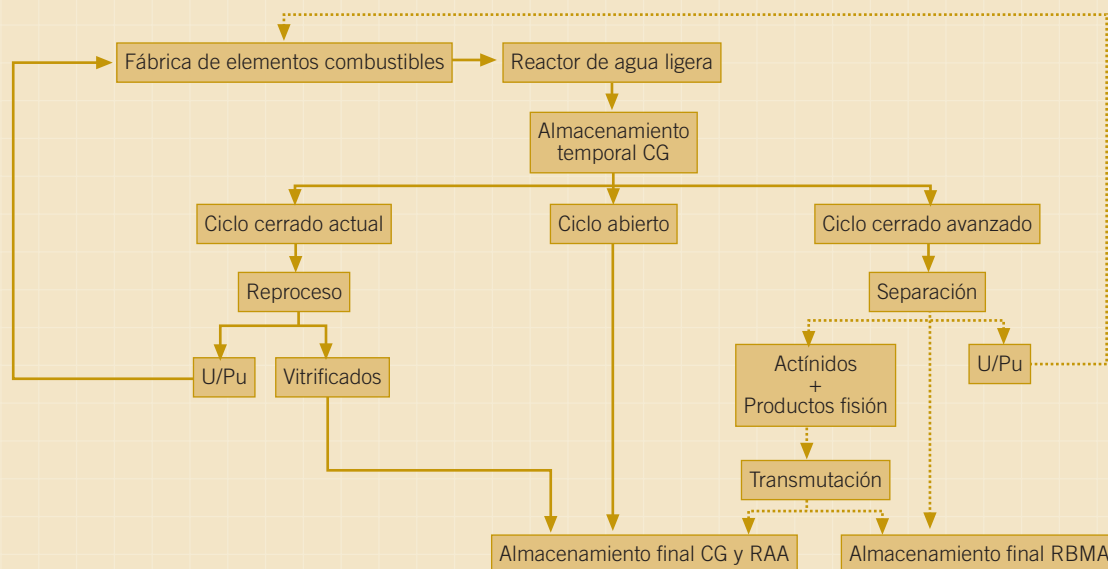
El *ciclo cerrado* actualmente implantado en algunos países como Francia y Japón, considera que el combustible gastado no es un residuo sino un material valorizable y se realiza su tratamiento (reproceso) con el fin de recuperar el uranio y el plutonio presentes en ellos para ser utilizados como nuevos combustibles.

Existe también la posibilidad del denominado *ciclo cerrado avanzado* en el que se separaran algunos radionucleidos con largo período 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 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).

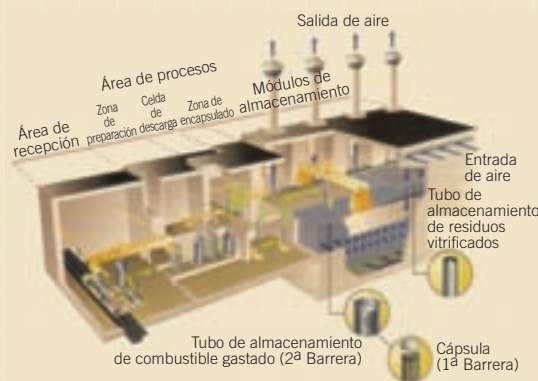
En España la opción de gestión del combustible gastado adoptada es la de ciclo abierto, por lo que una vez descargado el combustible en las propias piscinas de la central y puesto que la capacidad de éstas es limitada, es necesario que al cabo de un cierto tiempo el combustible sea trasladado a unos almacenes intermedios a la espera de su almacenamiento final.

La solución prevista en el *VI Plan General de Residuos Radiactivos* es disponer en el año 2010 de un Alma-



Opciones de gestión del combustible gastado

cén Temporal Centralizado (ATC), para albergar en condiciones de seguridad el combustible gastado de todas las centrales nucleares españolas.



Esquema ATC Camaras

Hasta que se disponga del ATC se están adoptando soluciones particulares para cada central nuclear como son la ampliación de la capacidad de sus piscinas o la construcción de almacenes temporales individuales (ATI) en los que se dispone un número variable de contenedores con elementos combustibles gastados en su interior.

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 solidificán-

dolos 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 sólo resta el desmantelamiento del edificio del reactor sometido a un período de espera y decaimiento denominado fase de latencia, que tiene una duración prevista de unos 25 años.

Ya se ha autorizado el desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera en Zorita (Guadalajara)

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 VI plan vigente, fue aprobado en junio de 2006.

El control de la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos corresponde en España al Consejo de Seguridad Nuclear.

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. La responsabilidad de la gestión hasta que los residuos son entregados a Enresa corresponde a los productores.

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.

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), organismo independiente de la Administración Central del Estado.

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. En total, el CSN cuenta con una plantilla de más de 450 trabajadores, con un 62% de personal técnico de alta cualificación, especializado en seguridad nuclear y protección radiológica.

El CSN está capacitado para suspender la construcción o el funcionamiento de las instalaciones 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 éste 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



Consejo de Seguridad Nuclear

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.

De acuerdo con 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, sus funciones son, entre otras:

- Proponer al Gobierno las reglamentaciones necesarias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, así como las revisiones que considere conveniente.
- Realizar inspecciones a las instalaciones nucleares y radiactivas desde su diseño hasta su clausura.
- Controlar las medidas de protección radiológica de los trabajadores expuestos, público y medio ambiente.
- Colaborar con las autoridades competentes en relación con los programas de protección radiológica de las personas sometidas a procedimientos de diagnóstico o tratamiento médico con radiaciones ionizantes.
- Vigilar y controlar los niveles de radiación medioambiental en el territorio nacional (para más información consultar *El CSN y la vigilancia radiológica del medio ambiente: guía para el profesorado, CSN-MEC, 2007*).
- Examinar y conceder licencias a las personas que trabajan en las instalaciones radiactivas y acreditar a las personas que trabajan en las instalaciones de radiodiagnóstico médico.
- Estudiar e informar cada proyecto de instalación nuclear o radiactiva.
- Controlar el funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas e imponer la corrección de posibles deficiencias.
- Proporcionar apoyo técnico en caso de emergencia nuclear o radiactiva y participar en la elaboración de los planes de emergencia.
- Promover planes de investigación.
- Informar a la opinión pública y a las Cortes.

Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE)

La Organización de Respuesta ante Emergencias (ORE) es la estructura operativa establecida por el CSN para llevar a cabo las funciones que le corresponden en caso de emergencia nuclear o radiactiva y para lo que está dotado con los recursos humanos, medios técnicos y procedimientos operativos adecuados.

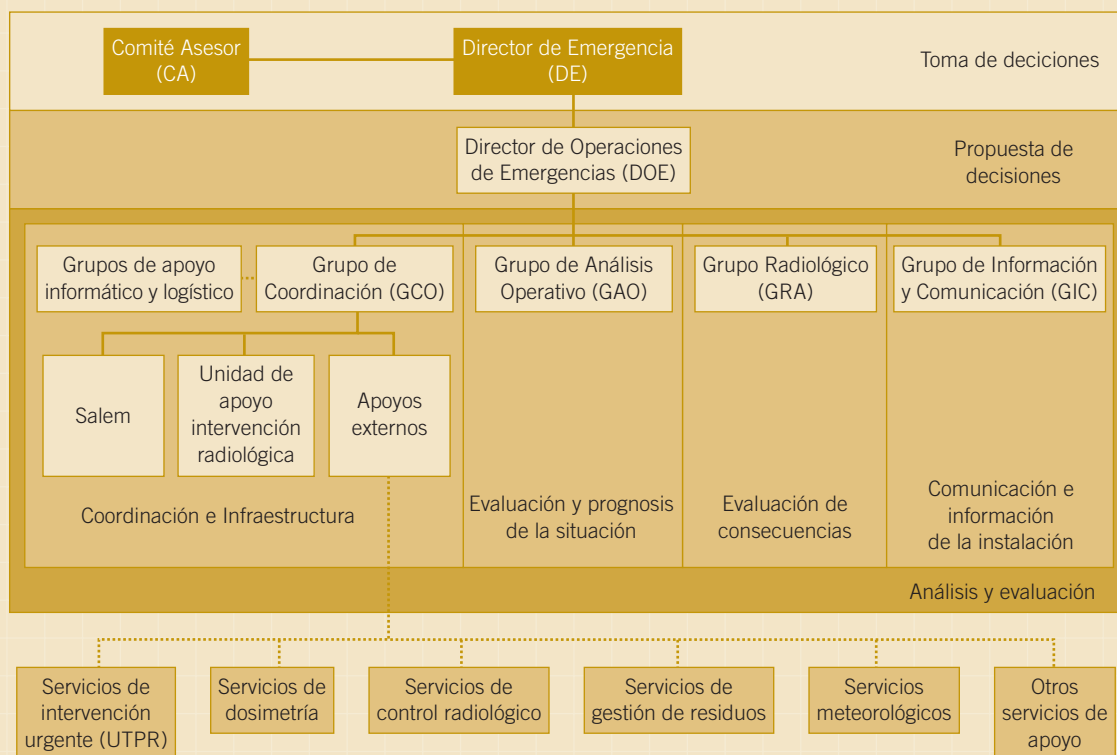
La ORE tiene como funciones exclusivas:

- 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 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.

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.

Además la ORE cuenta con los siguientes apoyos externos en el caso de que fuera necesaria su participación en una emergencia:



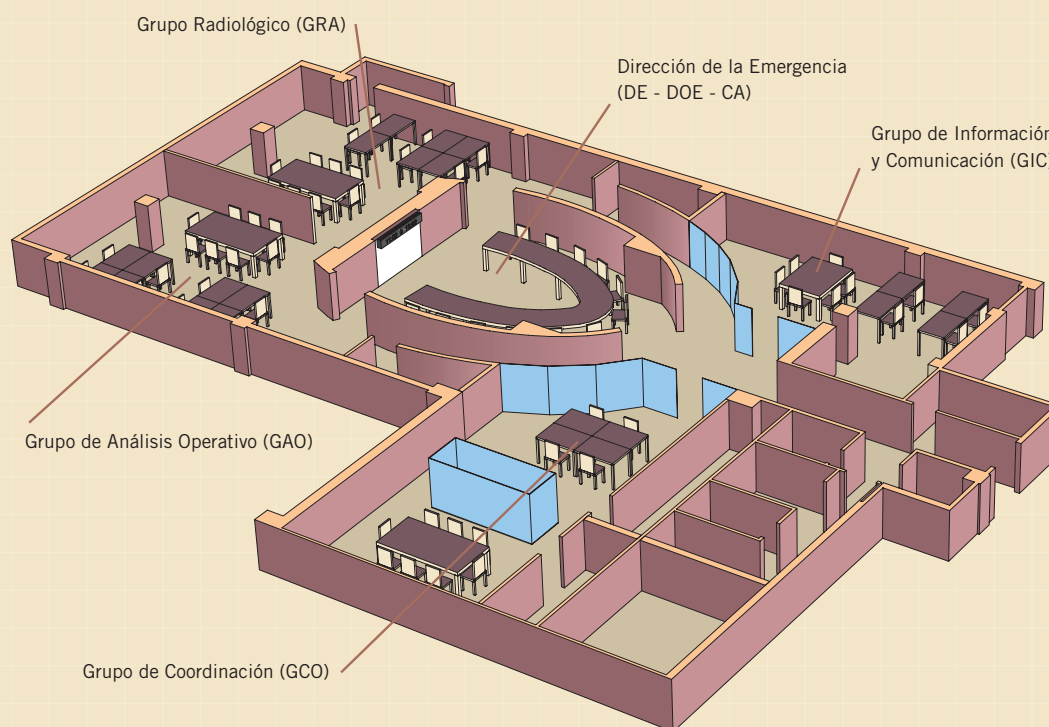
Organización de respuesta del CSN ante emergencias

- Unidades móviles de vigilancia radiológica ambiental.
- Unidad móvil de dosimetría interna.
- Unidad Técnica de Protección Radiológica (UTPR) que colaboraría con la Unidad de apoyo a la intervención radiológica.
- Agencia Estatal de Meteorología, que colaboraría en el suministro de datos meteorológicos y de previsiones.
- Empresa Nacional de Residuos, S.A. (Enresa), que colaboraría en tareas de descontaminación en general, control de residuos y recuperación de zonas afectadas.
- Diversos laboratorios para el análisis de muestras.

La sala de emergencias (Salem)

La Sala de Emergencias del CSN atendida por técnicos especializados funciona las 24 horas del día de todos los días del año. Está dotada de un sofisticado sistema de comunicaciones que permiten 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.

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.



Plano general de la Sala de Emergencias del CSN

Desde el punto de vista físico, 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.

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. 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.

En la Escala INES los accidentes e incidentes nucleares y radiológicos se clasifican por referencia a tres áreas de impacto:

- **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



Descripción general de los niveles de la INES

- 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 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 (p. ej., 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 nucleoelectrica 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)			

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.

Becquerelio. Unidad de actividad radiactiva, de símbolo Bq. Un becquerelio 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 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"). 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 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. Reciben también el nombre de reacciones tisulares y 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 ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Julio}$). 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 gamma cámara 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. Comisión Internacional de Protección Radiológica.

CIUMR. Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas

Ión. 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 4×10^{-7} y 1×10^{-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.

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 ésta no se conoce con exactitud, en todo caso, sería muy pequeño habiéndose obtenido tan sólo 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 los riesgos de la recepción de dosis de radiación 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 $1,67 \text{ e}^{-27} \text{ g}$.

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 interactuar 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 par-

tículas 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 orga-

nismo 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 4×10^{-7} y 1.5×10^{-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 éstos, 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 profun-

dos 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 sólo 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 $2.58 \cdot 10^{-4}$ 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.

Torio. Elemento químico de número atómico 90 y símbolo Th. Perteneciente 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. Perteneció 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. Aquél que contiene un porcentaje del isótopo U-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.º 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.).
- *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.
- *La protección de las trabajadoras gestantes expuestas a radiaciones ionizantes en el ámbito sanitario*. CSN, 2005 (32 págs.).
- *La protección radiológica en el medio sanitario*. CSN, 2004 (54 págs.).
- *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.).
- *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)
- 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.
- Real Decreto 1836/2008, de 18 de enero, que modifica al Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre por el que se aprueba el *Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas*. BOE de 18 de febrero de 2008.
- Real Decreto 783/2001 de 6 de julio por el que se aprueba el *Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes*. BOE de 26 de julio de 2001.
- *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.
- *Utilización de la energía nuclear para producir electricidad*. CSN, 2005 (20 págs.)
- *VI Plan General de Residuos Radiactivos*, aprobado en el Consejo de Ministros celebrado el 23 de junio de 2006. www.mityc.es

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.mepsyd.es
- Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA): www.iaea.org
- Sociedad Española de Física Médica (SEFM): www.sefm.es
- Sociedad Española de Medicina Nuclear (SEMNU): www.semn.es
- Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR): www.sepr.es
- Sociedad Nuclear Española (SNE): www.sne.es
- www.iter.org

Esta guía didáctica ha sido actualizada y revisada por el siguiente grupo de trabajo

Actualización técnica de contenidos

- Belén Tamayo Tamayo (coordinadora), CSN
- Julia López de la Higuera, CSN
- Paula Muñoz Pelayo, CSN
- M^a Dolores Rueda Guerrero, CSN

Revisión pedagógica de contenidos

- Rosa Desirée García Ferreira, profesora de Enseñanza Secundaria
- Pilar Gómez Sotero, CSN

Coordinación editorial

- Teresa Ventosa de la Cruz, CSN

Coordinación administrativa

- Ana Cestero Colado, CSN

Radiación y protección **radiológica**

Guía didáctica para centros
de enseñanza secundaria



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN

isftic

Instituto Superior de Formación y
Recursos en Red para el Profesorado