

3 Aplicaciones industriales de las radiaciones ionizantes. Efectos sobre la materia y trazadores

En este capítulo se describen una serie de aplicaciones de las radiaciones ionizantes de acuerdo con la clasificación sistematizada establecida en el capítulo anterior. Se trata de aquéllas basadas en los efectos de dichas radiaciones sobre la materia, y de la utilización de trazadores radiactivos.

3.1 Aplicaciones basadas en los efectos de la radiación sobre la materia

Constituye este grupo un conjunto muy diverso de aplicaciones de los radionucleidos en muchos campos de la industria. Se engloban en él todas aquéllas en que se desea y se aprovecha el cambio en alguna propiedad de un material producido por la radiación ionizante. Debido a la gran variedad de aplicaciones existentes con este fundamento es difícil dar una clasificación sistemática en este grupo. No obstante, parece lógico dividir las en dos grupos en función de las actividades de los radionucleidos empleados: actividades bajas y actividades altas. Es evidente que tanto el coste como las precauciones y exigencias de protección radiológica diferirán sensiblemente en ambos casos.

3.1.1 Actividades bajas

En el amplio espectro de aplicaciones de este grupo pueden destacarse las siguientes:

1. Eliminación de electricidad estática. Muchas industrias que manejan productos aislantes (textil, papel, plástico, vidrio, etc.) sufren el fenómeno de la acumulación de electricidad estática, por los rozamientos existentes en los procesos de fabricación. Ello constituye, en muchos casos, un serio problema que limita la capacidad de producción. Los mazos de hilos circulando por los telares en las industrias textiles sufren acumulación de polvo y roturas por efecto de la repulsión electrostática de las cargas acumuladas. Las bandas de papel moviéndose entre rodillos en los procesos de fabricación de las papeleras o en las rotativas de las imprentas tienden a desplazarse y romperse también por la acumulación de cargas. Inconvenientes similares se presentan en la fabricación de plástico, líquidos inflamables (posibilidad de explosiones), el pesaje en microbalanzas, la formación de escarcha en aviones, etc.

Estas industrias tradicionales ya pusieron a punto, desde hace tiempo, diversos procedimientos para intentar disminuir los efectos de este problema, entre los que pueden mencionarse: la utilización de sales higroscópicas; ceras solubles en agua; humidificación de la atmósfera; el uso de campos electromagnéticos de alta frecuencia; el empleo de descargas eléctricas provocando la ionización del aire, etc. La utilización de fuentes radiactivas para producir ionización con las radiaciones emitidas se ha generalizado bastante en las últimas décadas en las industrias antes reseñadas. Las cargas eléctricas así generadas en el aire contrarrestan las estáticas de signo contrario acumuladas en el material.

En la figura 3.1 se muestra un esquema del funcionamiento de este tipo de sondas. Si bien al principio se emplearon emisores α (Ra-226, Po-210), actualmente se han impuesto los emisores β , tales como Sr-90/Y-90, Tl-204, Kr-85, Pm-147, H-3, etc., con lo que se consigue un mayor volumen de aire ionizado por la creación de pares iónicos, por parte de las partículas, de una forma más repartida y extendida.

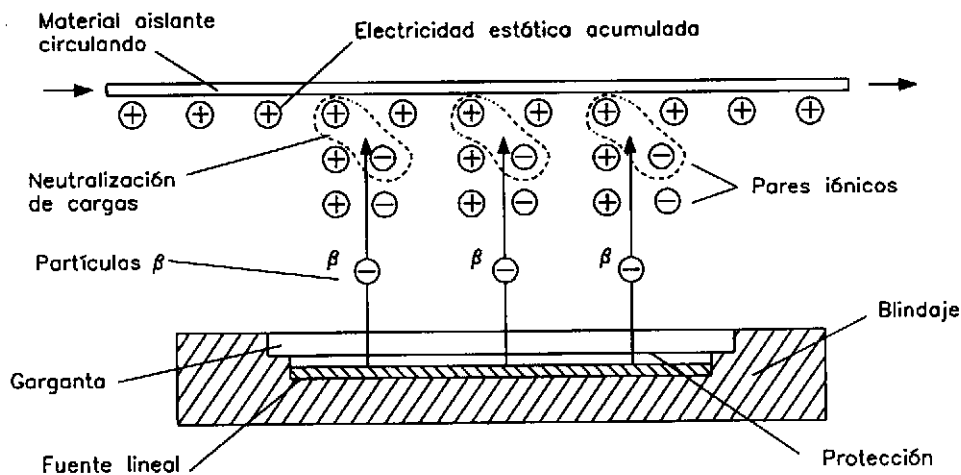
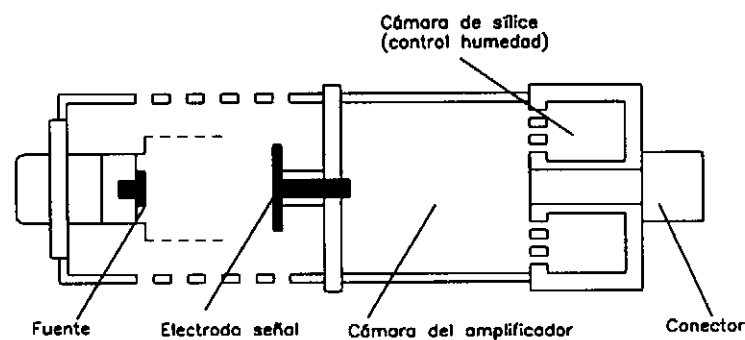


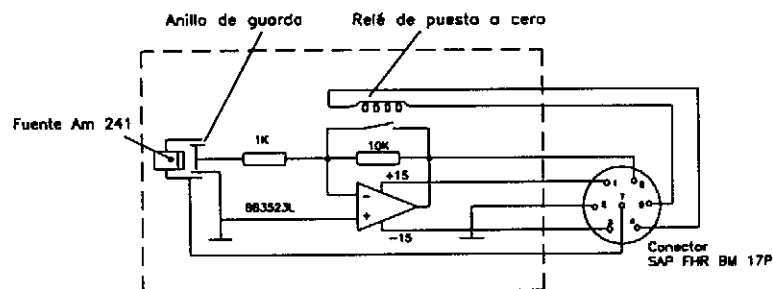
Fig. 3.1 Esquema de las sondas para la eliminación de electricidad estática en industrias

Las fuentes suelen ser lineales, alojadas en un blindaje, con una garganta en forma de cuña en la dirección del haz útil. Las distancias fuente-material oscilan de 5 a 40 cm y las actividades son del orden de 1 mCi por cm² de material cargado expuesto, con unas corrientes iónicas totales del orden de 2 μ A. No se utilizan actividades más altas para evitar la recombinación de pares iónicos en el aire con la consiguiente pérdida de efectividad.

2. Ionización de tubos electrónicos. Se emplean radionucleidos con pequeñas actividades en tubos de iluminación o en válvulas electrónicas para ionizar, de forma parcial y permanente, el gas de llenado, con el objetivo de disminuir la inercia del cebado de las descargas. El método ha sido bastante empleado en tubos de alta frecuencia (radar), reduciendo los tiempos de encendido en factores del orden de 1000, para lo cual se usan fuentes gaseosas de H-3 y Kr-85. Con el mismo fundamento se han utilizado fuentes radiactivas en las soldaduras con arco en atmósferas de argón y en las lámparas de arco de carbón (facilitando las descargas).



(a)



(b)

Fig. 3.2 Principio de funcionamiento de los detectores de humos. a) Esquema del aparato. b) Circuito del amplificador de corriente de la señal.

3. Detectores de humos. Son detectores contraincendios de uso muy extendido en edificios comerciales, oficinas, etc. Son cámaras de ionización, con fuentes emisoras de partículas α incorporadas (Am-241). En la figura 3.2 se muestra el principio de su funcionamiento, basado en dos cámaras idénticas, una de las cuales está cubierta con una rejilla perforada, de forma que pueda penetrar el aire del exterior. En caso de incendio, el humo producido entra en esta cámara haciendo

variar la proporción de pares iónicos recombinados y, por tanto, la corriente iónica, respecto a la de la otra cámara que no está en contacto con el humo. Con un circuito eléctrico que compense las dos corrientes, este desequilibrio genera la aparición de las correspondientes alarmas que pueden ser acústicas, luminosas, etc.

4. Producción de luz "fría". Se denomina luz fría la producida al margen de los métodos clásicos a partir de la electricidad. Su fundamento es el de la luminiscencia o fluorescencia, fenómeno conocido ya desde que comenzaron a usarse las radiaciones ionizantes, las cuales al interaccionar con algunas sustancias producen destellos luminosos. Las partículas α , β o γ emitidas por radionucleidos ionizan los átomos arrancando electrones, de modo que, al desexcitarse y cubrirse las vacantes, se generan fotones, los cuales en algunos átomos (sustancias luminiscentes) tienen la frecuencia propia del espectro visible. En general se han utilizado fuentes α (Ra-226, Po-210), aunque más modernamente se han impuesto los emisores β (Sr-90/Y-90, Tl-204, H-3, Cs-137, etc.), con SZn. Para una mayor eficiencia en la producción de luz hay que mezclar íntimamente el radionucleido con la sustancia luminiscente (povos mezclados), evitando en lo posible la autoabsorción de la luz emitida.

Este tipo de generadores de luz tiene gran interés en zonas de difícil accesibilidad, donde se carece del suministro clásico de energía eléctrica o se quiere garantizar la visibilidad en situaciones de emergencia. Es el caso de señalizaciones en ferrocarriles, en aeropuertos, en la navegación marítima (faros, submarinos), en minería, en depósitos de municiones, en refinerías, etc. Una fuente de Kr-85/SZn de 1 Ci de actividad se ve, de noche, a una distancia de 900 m. El máximo rendimiento se obtiene en la franja verde-amarillo.

5. Otras aplicaciones. Otras aplicaciones menos extendidas son: la producción de semiconductores mediante la irradiación con partículas cargadas o con neutrones; los aparatos medidores de campos electrostáticos; los dispositivos para la medida de resistencias eléctricas elevadas, etc. Conviene mencionar aquí una aplicación muy extendida, desde la década de los sesenta, que actualmente está en vías de desaparición por no haber superado el principio de justificación y el análisis coste-beneficio desde el punto de vista de la radioprotección. Se trata de los denominados pararrayos radiactivos, que empleaban un emisor α en la punta para ionizar el aire de las cercanías. El escaso efecto, debido al corto alcance de este tipo de partículas, ha sido la causa de que, en la mayoría de países donde su uso estaba ampliamente extendido, se proceda a su desmantelamiento.

3.1.2 Actividades altas

Cuando se usan actividades altas, este grupo de aplicaciones está encaminado, en general, a producciones industriales de cierta entidad. Las más destacables son las siguientes:

1. Producción de compuestos químicos. Por su capacidad de romper enlaces químicos las radiaciones ionizantes en algunos casos pueden constituir un medio para producir o activar cierto tipo de reacciones químicas. Con una preparación y enfoque apropiados, mediante la irradiación pueden obtenerse algunos productos químicos, especialmente en el ámbito de los plásticos. Si bien, en teoría,

se conocen bastantes compuestos que se pueden producir por este sistema, en la práctica el elevado coste de obtención, derivado de la necesidad de utilizar actividades elevadas, hace que no sean métodos comerciales de amplia difusión.

El campo de la fabricación de plásticos es muy apropiado para estos fines, ya que la radiación crea fácilmente radicales (monómeros), que adecuadamente recombinados pueden ir generando las macromoléculas típicas de estos productos. El ámbito de la química orgánica es aquél en que se han llevado a cabo investigaciones y desarrollos con más éxito. Pueden citarse:

- la oxidación catalítica de las olefinas;
- la isomerización catalítica de los ciclo-alcanos;
- la conversión de naftas en hidrocarburos aromáticos;
- las polimerizaciones para producción de plásticos variados;
- las copolimerizaciones en la producción de plásticos;
- la vulcanización del caucho como alternativa al uso de hornos;
- la producción de polietileno reticulado termorresistente para su uso como aislante de alambres y cables, como revestimiento de superficies de madera y plástico, de lentes de contacto, etc.;
- la producción de fibras de CSi, resistentes a muy altas temperaturas, obtenidas a partir de fibras de policarbonilano, mediante irradiación y posterior calentamiento.

2. Endurecimiento superficial de materiales. Algunos productos presentan la propiedad de sufrir alteraciones superficiales con la irradiación a altas dosis, de modo que aumenta considerablemente su endurecimiento. Es el caso del caucho, de conglomerados de madera, maderas con capas de pinturas o barnices, etc. Estas técnicas se están imponiendo a los métodos convencionales de curado de superficies, consistentes en la impregnación con solventes orgánicos que, al evaporarse, forman películas resistentes de polímero en el sustrato. Estos solventes evaporados son unos contaminantes de la atmósfera que contribuyen al efecto invernadero. Una variante de este grupo de aplicaciones es la utilización de radiación para la conservación de piezas de madera estructurales o en figuras artísticas, puesto que eliminan los elementos patógenos (insectos, larvas, etc.) que las contaminan.

3. Purificación de gases de combustión. Mediante la utilización de haces de electrones se ha conseguido eliminar el SO_2 y NO_x presentes en los gases de combustión causantes de la lluvia ácida, al transformarse en la atmósfera en ácido sulfúrico y nítrico respectivamente. La combinación de este tipo de irradiación con la adición previa de amoníaco consigue convertir el SO_2 y el NO_x en sulfato y nitrato de amonio que se pueden recuperar para su uso como fertilizantes.

4. Desinfección de lodos, agua y residuos biomédicos. Técnica útil para la eliminación de organismos patógenos presentes en los lodos cloacales, residuos de los procesos de tratamiento y depuración de aguas residuales, así como en los residuos de las actividades hospitalarias. Se trata de procesos en fase de investigación que utilizan aceleradores de electrones o fuentes intensas de fotones.

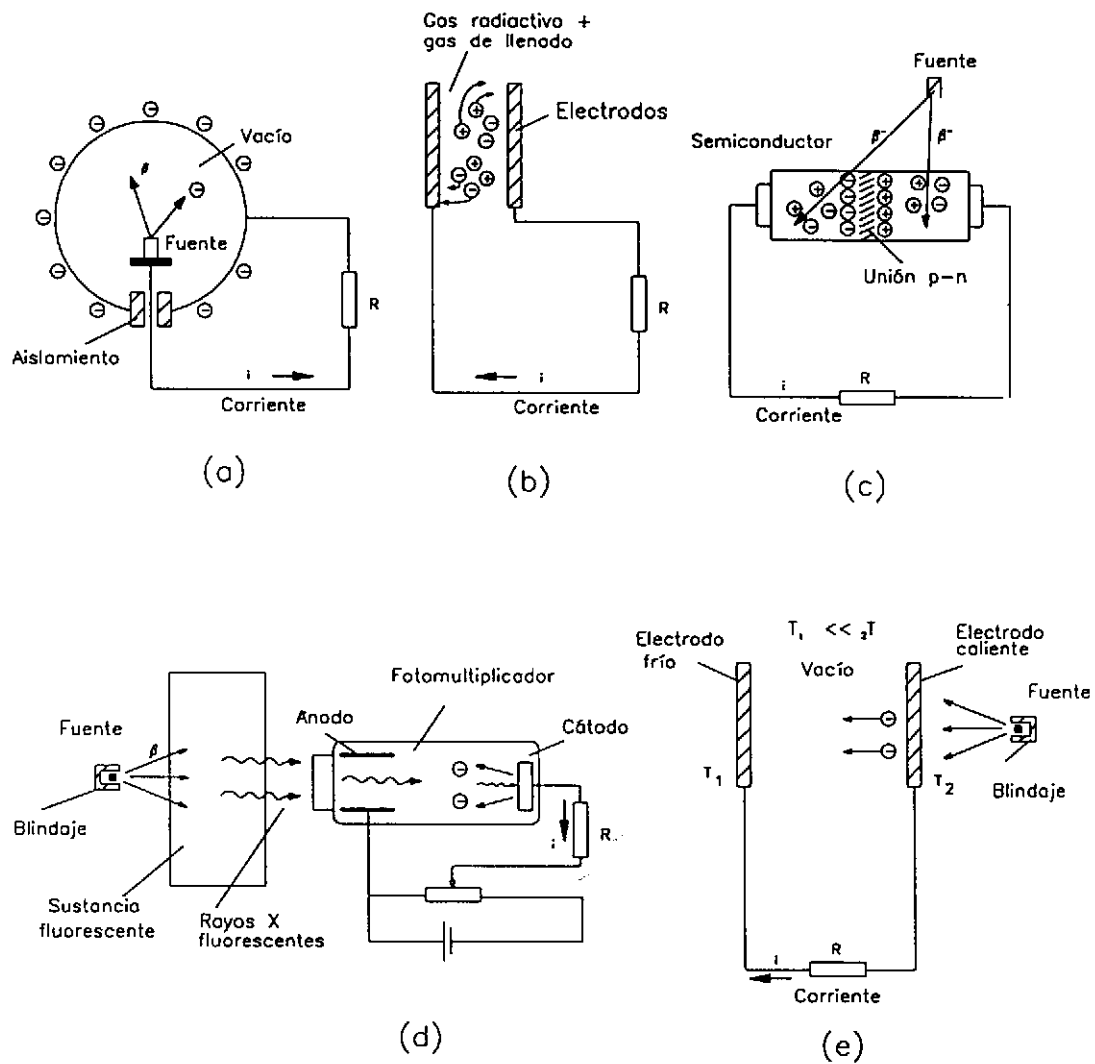


Fig. 3.3 Fundamentos de varios tipos de baterías eléctricas nucleares: (a) carga directa; (b) potencial de contacto; (c) semiconductor; (d) efecto fotoeléctrico; (e) efecto termiónico.

5. Baterías eléctricas nucleares. Son un conjunto de variados dispositivos diseñados para producir pequeñas potencias eléctricas, de forma duradera y autónoma, para su uso en lugares inaccesibles, donde no existe suministro de energía alternativo, y en biotecnología (marcapasos, etc.). Su uso se extendió a raíz del programa SNAP de investigación espacial de la NASA (1961), y es una fuente de potencia de gran utilidad en satélites artificiales, instrumentación lunar, etc., en competencia con las células solares, cuyo rendimiento presenta el inconveniente de su dependencia de la orientación. Este tipo de baterías tienen diversos fundamentos:

- **Carga directa.** Según el esquema de la figura 3.3, contienen un emisor β situado en un electrodo central (emisor), y un electrodo exterior colector que recibe los electrones (partículas β). Con un elevado vacío y un buen aislamiento, el circuito puede proporcionar pequeñas potencias con diferencias de potencial de 7000 V y corrientes de 40 pA conseguidas en algunas baterías convencionales.
- **Potencial de contacto.** Consistente en dos electrodos a base de metales con potencial electroquímico y de contacto sensiblemente distintos. De acuerdo con la figura 3.3, si el espacio interior está lleno de una mezcla de un gas radiactivo y un gas de llenado, la ionización producida interacciona con los electrones de los electrodos con distinta intensidad en cada uno, dado su distinto potencial, estableciéndose una corriente eléctrica proporcional a la actividad del radionucleido empleado. Se ha utilizado H-3 y C-14 en forma de CO₂. Con fuentes de 50 mCi de H-3 se han conseguido diferencias de potencial de 1,5 a 1,7 V e intensidades de 10⁴ pA.
- **Semiconductores.** Tienen un fundamento similar al de los detectores de semiconductor. Tal como se indica en la figura 3.3, al irradiar con partículas, especialmente si son cargadas, una unión *p-n* de un semiconductor se produce un desequilibrio de las dos corrientes opuestas existentes, debidas a la barrera de potencial de la unión y a la temperatura, generándose una pequeña corriente en el circuito exterior a través de la resistencia *R*. Se han utilizado fuentes β de Pm-147 (T=2,6 años), de Ni-63 (T=125 a), Sr-90/Y-90, (T=28 a), etc., para conseguir diferencias de potencial de 0,3 V, corrientes de 10 μ A y potencias de 3·10⁻⁶W. Como en los casos anteriores, pero en especial en éste, dado el pequeño tamaño con que pueden fabricarse las pastillas de semiconductores, la conexión de muchos de estos elementos individuales permitirá conseguir potencias apreciables.
- **Efecto fotoeléctrico.** Están constituidas por la combinación de una sustancia luminiscente y una célula fotoeléctrica, según se muestra en la figura 3.3. Al incidir sobre una sustancia apropiada (SZn, SCd, etc.), las partículas β de una fuente de Pm-147 producen rayos X fluorescentes, los cuales, al incidir en un fotomultiplicador y arrancar electrones del cátodo, generan una potencia eléctrica en un circuito. Con una actividad de 4,5 Ci de Pm-147 se pueden conseguir diferencias de potencial de 1V y corrientes de 20 μ A. La actividad máxima a utilizar está limitada por el calentamiento de la célula.
- **Efecto termoelectrico.** Convierten el calor en electricidad (efecto Seebeck). Las partículas emitidas por un radionucleido calientan por bombardeo una de las dos soldaduras de un par termoelectrico, la cual incrementa su temperatura produciendo la correspondiente diferencia de potencial. También

pueden utilizarse uniones *p-n* de semiconductor. En el primer caso se emplean prioritariamente emisores α (Pu-239, Pu-238, Po-210), y en el segundo también emisores β (Sr-90/Y-90, Ce-144). Una sonda comercial, con 20000 Ci de Sr-90 en forma de titanato de estroncio y 72 termopares conectados en serie, proporciona una potencia total de unos 5 W.

- **Efecto termoiónico.** También basadas en la conversión de calor en electricidad. Según se observa en el esquema de la figura 3.3, se establece un circuito entre los dos electrodos y uno de ellos se calienta con el bombardeo de las partículas emitidas por un radionucleido. Si este electrodo tiene una alta sensibilidad para la emisión de electrones al aumentar su temperatura (efecto termoiónico), se establecerá una corriente eléctrica apreciable si el vacío es elevado. Con temperaturas de unos 1100°C pueden obtenerse rendimientos del 25-30%.

En las últimas décadas, en lugar de los radionucleidos mencionados también se han utilizado pequeños reactores nucleares como fuente de calor necesaria en estos tipos de baterías descritas, que se han incorporado en la mayoría de los satélites artificiales que describen órbitas alrededor de la Tierra. En ambos casos existe un riesgo radiológico derivado de las posibles averías, con las consiguientes caídas de sustancias radiactivas sobre la superficie terrestre, como ya ha ocurrido en algunas ocasiones.

3.1.3 Las plantas de irradiación

Existen un conjunto de aplicaciones de las radiaciones que exigen la utilización de actividades muy altas, hasta millones de curios, lo cual conlleva la necesidad de proyectar instalaciones bastante complejas, dadas sus necesidades: protección del personal; elevadas capacidades de producción; requisitos de seguridad; etc. Es el caso de la conservación de alimentos, la radioesterilización y la radioterapia. Esta última se describe en el ámbito de las aplicaciones en medicina.

En la conservación de alimentos se pretende eliminar los organismos patógenos responsables de su deterioro (larvas, bacterias, etc.) mediante el uso de radiación electromagnética o aceleradores de electrones. Con dosis relativamente altas se puede alargar el período de conservación de muchos productos alimenticios como método alternativo o complementario del uso de cámaras frigoríficas. Con dosis absorbidas de hasta 1 kGy se logra la desinsectación, se inhiben las brotaciones y se retrasan los períodos de maduración de muchos vegetales. Con dosis entre 1 y 10 kGy se reduce considerablemente la carga microbiana y aumentan bastante los períodos de conservación. Dosis superiores, que podrían permitir una conservación indefinida, no son aconsejables, ya que producen alteraciones apreciables en el contenido vitamínico y en la textura y aspecto exterior, color, rugosidad, sabor, etc., de muchos alimentos. El fundamento de esta técnica estriba en los efectos biológicos producidos por altas dosis de radiaciones ionizantes.

Esta aplicación está bastante extendida, especialmente en países situados en regiones tropicales y de elevada demografía, con el objetivo de permitir la conservación de muchas variedades de alimentos entre las cosechas consecutivas. Varias organizaciones internacionales, especialmente las Naciones Unidas, a través de la FAO y el OIEA, [1], promocionan, desde hace años, el uso de esta tecnología

para resolver el problema de las pérdidas en las cosechas de dichos países debidas, entre otras causas, a: las malas condiciones ambientales (altas humedades y temperaturas), la poca experiencia en los sistemas convencionales de tratamiento (secado, enlatado, congelación, fermentación, etc.), las plagas de insectos, etc.

Los objetivos a alcanzar son los siguientes:

- Inhibir la germinación de legumbres y hortalizas (patatas, cebollas, ajos, ñames, etc.).
- Alargar el período de conservación de productos frescos (frutas, pescado, carne, etc.), retrasando su maduración (fruta), y disminuyendo la cantidad de microorganismos causantes de la descomposición (carne).
- Eliminar los organismos patógenos y parásitos (insectos).
- La desinsectación de cereales.
- La desinfectación de microbios presentes en las especias y los ingredientes de los alimentos desecados.

A nivel mundial se han realizado múltiples investigaciones previas a la autorización, preceptiva en la mayoría de los países, de la comercialización de alimentos irradiados [2]. En general se ha recomendado la aceptabilidad, desde el punto de vista toxicológico, microbiológico y de nutrición, de cualquier alimento con dosis por debajo de 10 kGy [3]. No existen problemas de dosis internas a las personas por su ingestión, al utilizarse para la irradiación electrones o rayos gamma, de energías máximas de unos 10 MeV y 1,5 MeV, respectivamente, que no producen radiactividad inducida.

Los intervalos de dosis apropiadas para los alimentos irradiados más representativos son los siguientes,[4]:

- Pescado:
 - Control infestación pescado seco (0,5 kGy).
 - Reducción carga microbiana (2 - 3 kGy).
 - Eliminación microorganismos patógenos (3 - 5 kGy).
- Patatas y cebollas:
 - Inhibición de la germinación (0,05 - 0,15 kGy).
- Cereales alimenticios:
 - Control infestación (0,5 - 1 kGy).
- Granos de cacao:
 - Control infestación (0,5 - 1 kGy).
 - Reducción carga microbiana (2 - 3 kGy).
- Dátiles:
 - Control infestación (0,5 - 1 kGy).
- Mangos:
 - Control infestación (0,25 - 0,5 kGy).
 - Retardar la maduración (0,5 - 1 kGy).
- Especias y condimentos:
 - Control infestación (0,5 - 1 kGy).
 - Reducción carga microbiana (5 - 10 kGy).
- Carne y pollo:
 - Prolongar la conservación y eliminación de microorganismos patógenos (2 - 4 kGy).

En la tabla 3.1 se da una relación de productos alimenticios irradiados, cuyo consumo humano ha sido autorizado en diversos países, [4].

Tabla 3.1 Relación de productos alimenticios irradiados, cuyo consumo humano ha sido autorizado en diversos países [4]

Producto	País	Fecha de autorización
FRUTAS Y VERDURAS		
Patatas	Rusia	1958
	Canadá	1960
	Estados Unidos de América	1964
	Israel	1967
	España	1969
	Hungría ^a	1969
	Hungría ^d	1972
	Dinamarca	1970
	Países Bajos	1970
	Uruguay	1970
	Bulgaria ^a	1972
	Filipinas ^b	1972
	Japón	1972
	Francia ^b	1972
	Italia	1973
	República Federal de Alemania ^a	1974
Chile ^d	1974	
Sudáfrica	1977	
Cebollas	Canadá	1965
	Rusia ^a	1967
	Rusia	1973
	Israel	1968
	Países Bajos ^a	1971
	Países Bajos	1975
	Bulgaria ^a	1972
	Hungría ^d	1973
	Tailandia	1973
	Italia	1973
	España	1975
	Ajos	Bulgaria ^a
Italia		1973
Frutas secas	Rusia	1966
Frutas y verduras frescas	Bulgaria ^a	1972
	Rusia ^a	1964
Champiñones	Bulgaria ^a	1972
	(tomates, melocotones, albaricoques, cerezas, frambuesas, uvas)	
Champiñones	Países Bajos	1969
Espárragos	Países Bajos ^a	1969
Fresas	Países Bajos ^a	1969
	Hungría ^a	1973
Mangos	Sudáfrica	1977

Tabla 3.1 (Continuación)

Producto	País	Fecha de autorización
Cacao (en grano)	Países Bajos ^a	1969
Relleno de verduras (para croquetas)	Países Bajos ^{a,d}	1974
Endivia (preenvasada y cortada)	Países Bajos ^{a,d}	1975
ESPECIAS Y CONDIMENTOS	Países Bajos ^a	1971
	Países Bajos ^{a,d}	1974
	Hungría (especies mixtas: pimienta negra, comino, pimentón, ajo seco: para su empleo en salchichas)	1974
CEREALES Y DERIVADOS		
Cereales	Rusia	1959
	Bulgaria ^a	1972
Trigo y harina de trigo (denominación hasta el 4 de marzo de 1966, derivados de trigo)	Estados Unidos de América	1963
Trigo, harina, harina integral de trigo	Canadá	1969
CARNE Y PESCADO		
Productos semipreparados de vaca, cerdo y conejo (en bolsas de plástico)	Rusia ^a	1964
Aves, sin vísceras (en bolsas de plástico)	Rusia ^a	1966
	Países Bajos ^a	1971
	Canadá ^d	1973
	Países Bajos	1976
Productos cárnicos preparados, carne frita, entrecot (en bolsas de plástico)	Rusia ^a	1967
Camarones	Países Bajos ^a	1970
Filetes de bacalao y egiefino	Canadá ^d	1973
OTROS PRODUCTOS		
Concentrados de alimentos secos (papilla de trigo sarraceno, budín de pasta de arroz)	Rusia	1966
	Bulgaria ^a	1972
Alimentos para pacientes que necesiten alimentos esterilizados como elemento esencial de su tratamiento	Reino Unido	1969
Comidas congeladas	Países Bajos ^c	1969
	República Federal de Alemania ^{a,c}	1972
Productos alimenticios frescos, enlatados y líquidos	Países Bajos ^c	1972

^a Lotes experimentales. ^b Autorización temporal por cinco años. ^c Pacientes de hospitales. ^d Comercialización a prueba. Países sin signo: Autorización sin restricciones.

Para la esterilización de material de medicina y farmacia se requieren dosis superiores a las utilizadas en la conservación de alimentos. Dependiendo del grado de esterilización deseado, las dosis pueden oscilar entre 20 y 40 kGy, ya que en este caso interesa fundamentalmente eliminar unos microorganismos, tales como las bacterias y los virus, que son los seres vivos más radiorresistentes. Como es sabido, la fracción de microorganismos supervivientes en una muestra irradiada sigue una ley exponencial decreciente con la dosis absorbida recibida. En consecuencia, nunca puede lograrse una esterilización absoluta, pero aquellas dosis indicadas son suficientes para que este procedimiento sea competitivo con los métodos convencionales (utilización de calor, de óxido de etileno, etc.).

En el ámbito de la medicina, esta técnica se aplica con mucho éxito en los productos desechables como jeringas, etc., en los que los métodos convencionales presentan serios inconvenientes, así como a prótesis, prendas de vestir, algodón, instrumental quirúrgico diverso, etc. En el campo de la industria farmacéutica la radioesterilización presenta la ventaja de poder esterilizar el producto al final de su proceso de fabricación sin necesidad de tomar especiales precauciones en las fases anteriores. Es una técnica cada vez más utilizada, tanto para esterilizar sustancias químicas que son materia prima, como los productos finales: antibióticos, pomadas, jarabes, soluciones salinas, gelatina, celulosa de carboximetil, almidón, parafina líquida, lanolina, Debrisan, etc. Recientemente está en fase expansiva la radioesterilización de cosméticos, tanto de sus materias primas como de los productos finales.

En las plantas de irradiación, ya sean para la conservación de alimentos o para la esterilización, se utilizan mayoritariamente fuentes radiactivas emisoras de fotones, en especial el Co-60, que emite fotones de 1,17 y 1,33 MeV y tiene un período de 5,2 a, con actividades que suelen estar comprendidas entre 100000 Ci y 2000000 Ci, dependiendo de la capacidad de producción de la planta. Modernamente se está introduciendo el uso de aceleradores de electrones (con energías entre 1 y 10 MeV) como fuentes de radiación alternativas.

Los aceleradores tienen la ventaja de ser una fuente de radiación con mayor manejabilidad y operabilidad, y el inconveniente de una menor penetración de los electrones en la materia, por lo que exige utilizar muestras de espesores reducidos.

Las elevadas intensidades de las fuentes empleadas convierten estas plantas en instalaciones complejas que exigen cuidadosos proyectos de ingeniería, con especial atención a los problemas de radioprotección del personal y del público en general. Los aspectos más importantes del proyecto son:

- La fuente y los mecanismos para su almacenamiento y manipulación a distancia.
- El blindaje biológico para la protección del personal.
- Los sistemas de seguridad redundantes y diversos.
- Los mecanismos para el movimiento del producto cerca de la fuente.

Según sea la trayectoria del producto, en general colocado en el interior de cajas, existen diversos tipos de irradiadores [5], [6]: estáticos y móviles, continuos e intermitentes, de un paso y de varios pasos, etc. En la figura 3.4 se muestra un esquema de trayectoria de las cajas en su movimiento alrededor de la fuente en un irradiador intermitente de 4 pasos, en el que cada caja conteniendo el producto se mueve ocupando sucesivamente 100 posiciones distintas. Tanto si el movimiento del

producto es intermitente como continuo, la velocidad del mismo, a lo largo de toda su trayectoria en la planta de irradiación, está ligada a la forma de dicha trayectoria en relación con la fuente, la actividad de esta última, la dosis total requerida en el producto y la producción deseada de la planta.

Las fuentes con actividades del orden de 10^6 Ci se calientan por la autoabsorción de los fotones en el

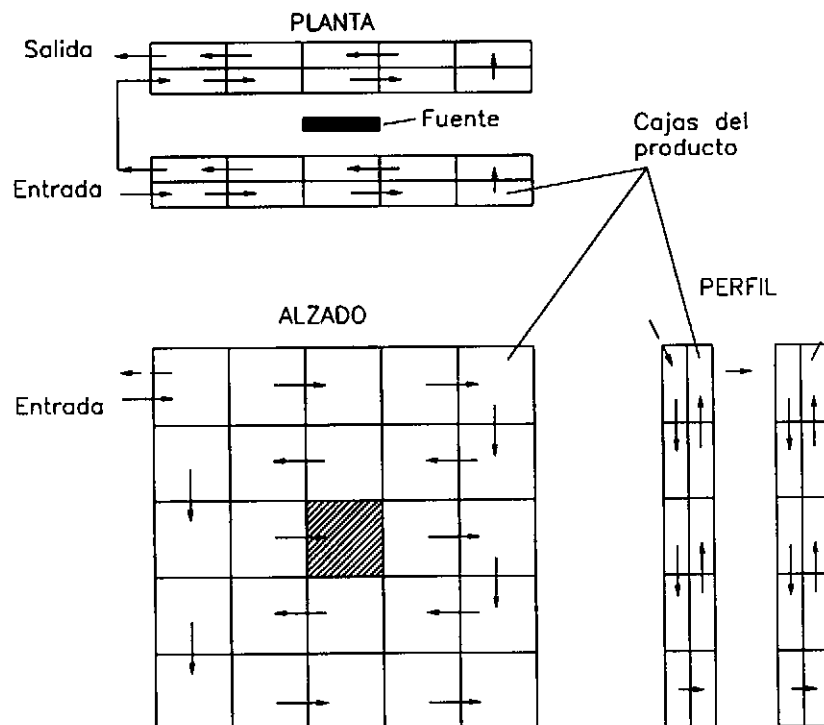


Fig. 3.4 Trayectoria del producto en un irradiador intermitente de 4 pasos

propio metal de la fuente, lo que hace recomendable que su almacenamiento, cuando la planta está parada, tenga que hacerse en pozos llenos de agua con un circuito de refrigeración apropiado.

Los laberintos adecuados para la entrada y salida del material (evitando caminos fáciles de la radiación hacia el exterior), los sistemas de acondicionamiento de aire para la evacuación del calor y la eliminación del ozono producido por la radiación, los mecanismos para el arrastre del material (hidráulicos, bandejas suspendidas, etc.) y el sistema para el cambio periódico de la fuente (puente grúa, posicionadores, etc.), son otros aspectos importantes del proyecto, sin olvidar los sistemas de seguridad y radioprotección. En la figura 3.5 se da una representación esquemática, muy simplificada,

de una planta de irradiación, indicando sus elementos más importantes.

Las fuentes están constituidas por un conjunto de cilindros de Co-60, agrupados en bastidores de forma rectangular. Su sustitución, a lo largo de la vida útil de la instalación, viene impuesta por su período de desintegración, de 5,2 años, con la consiguiente disminución exponencial de su actividad.

3.2 Aplicaciones de los trazadores radiactivos. Principios generales

Este grupo de aplicaciones de las radiaciones ionizantes tiene unas características específicas muy acusadas. En la mayoría de los casos se utilizan fuentes radiactivas no encapsuladas que se dispersan en un medio para obtener información del mismo.

3.2.1 Fundamentos y tipos de trazadores

El fundamento de todas las técnicas que utilizan trazadores consiste en la introducción de una sustancia en un sistema, de forma que éste se altere lo mínimo posible, al objeto de medir alguna de sus propiedades, aprovechando la facilidad de detección de dicha sustancia. Con este principio se han usado desde hace tiempo distintos tipos de trazadores:

- Los trazadores "sólidos". Son la versión más grosera, dada la escasa sensibilidad de su detección. Se ha empleado el salvado de avena, el almidón, el polen, etc., en corrientes de agua.
- Los trazadores químicos solubles. Sustancias químicas de elevada solubilidad en el líquido en el que se han de incorporar (generalmente agua). Los más empleados son los iones Cl^- , Cr_2O_7^- , Na^+ , etc. La detección debe hacerse mediante análisis químicos.
- Los trazadores colorantes. Son sustancias detectables por el color que producen en el líquido. Las más empleadas son la fluoresceína ($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_4\text{Na}_2$), el azul de metileno, la rodamina, la anilina, etc., y su detección debe realizarse por colorimetría.
- Los trazadores radiactivos. Objeto de la presente descripción, son sustancias radiactivas utilizadas generalmente en forma de fuentes no encapsuladas (disoluciones que se vierten en un fluido). Su interés radica en la elevada sensibilidad de los sistemas de detección de partículas, lo que permite medirlos fácilmente aun utilizando cantidades muy pequeñas.

También conviene mencionar, por su uso cada vez más extendido, los denominados trazadores isotópicos, constituidos por isótopos estables de elementos. Es el caso de las proporciones $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, muy estudiadas en ciencias de la tierra, hidrología, etc. Presentan como inconveniente la dificultad para caracterizarlos y medirlos (espectrómetros de masas).

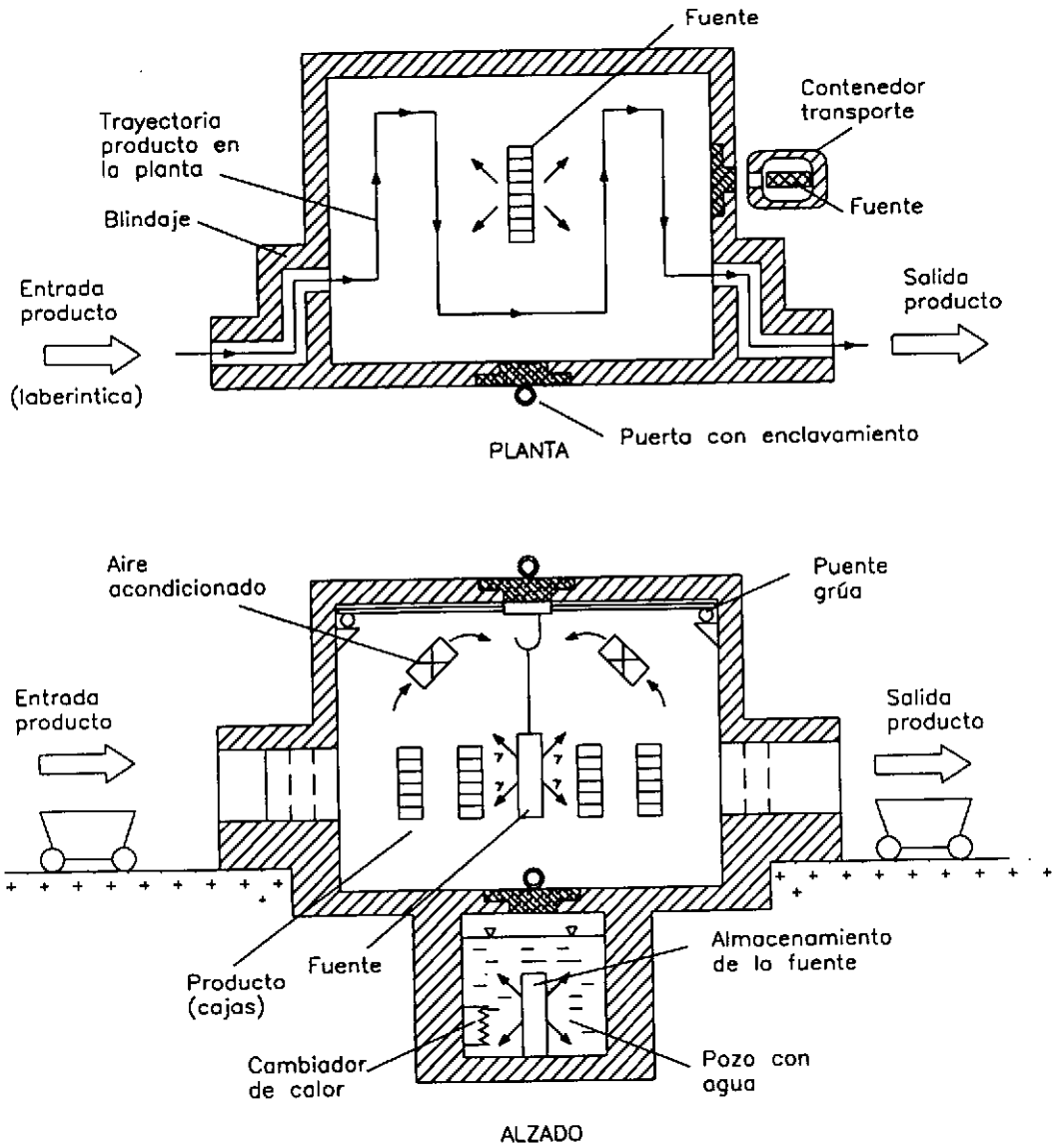


Fig. 3.5 Representación esquemática simplificada de una planta de irradiación

Además de su gran sensibilidad de detección, los trazadores radiactivos tienen la ventaja de que desaparecen del medio por desintegración transcurridos varios períodos. También es digna de mención la posibilidad de realizar medidas *in situ*, de forma relativamente fácil. Como inconvenientes, frente al uso de los trazadores convencionales, merece destacarse que su método de detección es caro y complejo, que para el manejo de los radionucleidos se precisan conocimientos y autorizaciones administrativas especiales y que, en muchos casos, su disponibilidad resulta difícil.

3.2.2 Condiciones del trazador ideal

Por las propias características de las experiencias realizadas con trazadores, es clásico citar la denominada "paradoja del trazador" [7], el cual debe ser a la vez una sustancia con unas propiedades fisicoquímicas lo más parecidas posibles al medio al que se debe incorporar y poseer alguna propiedad característica que la diferencia de este medio, al objeto de que pueda ser fácilmente detectada.

Es, pues, comprensible que, para que las experiencias tengan éxito, deba elegirse convenientemente el trazador más adecuado en cada caso. En este sentido se define el denominado "trazador ideal" como aquel que cumple una serie de condiciones, [8]:

- No debe interactuar con el medio (no ser adsorbido, etc.).
- No debe separarse del medio fluido (no precipitar, etc.).
- Debe ser estable química y biológicamente.
- No debe alterar las propiedades físicas y químicas del medio.
- No debe contaminar permanentemente el medio.

Además, es muy conveniente que el trazador escogido tenga una serie de propiedades complementarias:

- Que baste con utilizar pequeñas cantidades.
- Que sea de elevada solubilidad, si ha de actuar disuelto.
- Que se pueda detectar a muy bajas concentraciones de forma cuantitativa.
- Que sea fácil de manejar.
- Que tenga poca o nula toxicidad.
- Que sea barato y fácil de obtener.
- Que no exista previamente en el medio al que se va a incorporar.

Con estas condiciones, los trazadores radiactivos con un comportamiento más próximo al trazador ideal (para su uso en agua) son: I-131 (en forma de INa), H-3 ($^3\text{H}_2\text{O}$), Br-82 (BrNH_4), Co-60 ($(\text{ClN})_6$, CoK_3), etc. En la tabla 3.2 se dan las características de los más empleados. En la mayoría de aplicaciones el radionucleido va acompañado del denominado "portador", sustancia química o el mismo elemento en su forma estable (no radiactivo), para que la masa a utilizar sea significativa y medible. Téngase en cuenta que, con las actividades normalmente empleadas, si sólo se manipula el elemento radiactivo en su forma pura, en muchos casos su masa sería imposible de medir por su pequeñez.

Tabla 3.2 Radisótopos empleados como trazadores en experiencias con agua (Adaptado de [8])

Radisótopo	Portador	Período	E_γ (MeV)	E_β (MeV)	Toxicidad	Observaciones
Tritio (T, H_3^3)	Agua tritiada (THD)	12,3 años	No	0,018	Baja	Comportamiento muy similar al H_2O Elevada sensibilidad de detección Baja toxicidad Período largo-contamina mucho tiempo- Inconveniente existencia tritio natural
^{131}I	INa, IK	8,05 días	0,36 0,80 0,72	0,61 0,25 0,81	Elevada	Período corto Es el más utilizado
^{125}I	INa, IK	60 días	0,35	No (CE)	Elevada	Poco experimentado Difícil adquisición y disponibilidad
^{82}Br	$BrNH_4$	36 horas	0,547 0,77 1,04	0,465	Moderada	Período muy corto Precaución al disolverlo para evitar desprendimiento de Br por reacción Scilards-Chalmers
^{60}Co	$(CN)_6CoK_3$ EDTA-Co	5,2 años	1,33 1,17	0,32	Moderada	Muy usado en Israel Buen comportamiento Veneno químico (CMP=0,01 ppm) Período muy largo
^{51}Cr	EDTA-Cr	27 días	0,32	No (CE)	Baja	Mucha sensibilidad de detección Se puede adquirir a bajas actividades específicas
^{32}P	PO_4^{3-}	14,3 días	No	1,71	Moderada	Muy poco usado Fácil detección Alterable por bacterias
^{35}S	SO_4^{2-}	87,1 días	No	0,166	Moderada	Muy poco usado Fácil detección Alterable por bacterias
^{24}Na	CINa	14,9 horas	2,76 1,38	1,39	Moderada	Muy poco usado Período muy corto
^{198}Au	Cl_6AuH_3 con $CINH_4$ (Portador)	27 días	0,41 0,68	0,96 0,28 1,37	Moderada	Experiencia en España Poco usado
^{106}Ru	$RuNO(NO_2)$ $(NO_3)_2$	1 año	No	0,039	Elevada	Período algo largo
^{106}Rh	N_2ONa	30 seg	0,51	3,53		Comportamiento poco conocido

En la preparación de cada experiencia es muy importante seleccionar el trazador más adecuado basándose en una serie de criterios:

- Propiedades químicas. Normalmente se usa en forma de sales solubles y en forma aniónica.
- Capacidad de detección. En función de las partículas emitidas y de los equipos de detección disponibles.
- Período radiactivo. No debe ser ni muy pequeño (para dar tiempo a la realización de la experiencia), ni muy grande (ya que puede contaminar permanentemente el terreno).
- Características sanitarias. Deben seleccionarse aquellos que tengan menos toxicidad química y radiológica. A ser posible deberá inyectarse el trazador en el medio con una concentración inferior a la máxima permitida.

En cuanto a los posibles problemas de protección radiológica que pueden derivarse de la utilización de los trazadores radiactivos, especialmente en el campo de la hidrología, con la posible existencia de consumos u otros usos aguas abajo de los puntos de inyección, es recomendable emplear unas concentraciones inferiores a unos valores de referencia en los vertidos. La dilución posterior del trazador en el flujo de agua asegurará un riesgo mínimo para las personas. En este sentido conviene tener presente las modernas recomendaciones de la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) que sustituyen el uso de las antiguamente denominadas "concentraciones máximas permitidas", cuya incorporación, de forma continua, producía las "dosis máximas admisibles", por los límites de incorporación anual (LIA) de los diversos radionucleidos. Estos límites son aquellas cantidades de radionucleido incorporadas anualmente que producen en el organismo de las personas profesionalmente expuestas una dosis efectiva comprometida, integrada a 50 años, igual a la máxima anual de 50 mSv. Si la población afectada es el público en general, habrá que tener en cuenta que el límite es más pequeño. En la referencia [9] puede verse una descripción detallada de esta problemática, así como los valores de los LIA para muchos de los radionucleidos utilizados como trazadores.

3.2.3 Una aplicación muy característica: la medida de caudales

La medida de caudales de fluidos, comúnmente de agua, es una de las aplicaciones de los trazadores radiactivos más extendidas. Su descripción es muy representativa de los aspectos que hay que tener en cuenta en la planificación, medición e interpretación de los resultados obtenidos en las técnicas asociadas al empleo de los trazadores. Es una aplicación bastante extendida, tanto en la industria (caudales de fluidos en tuberías), como en hidrología (canales, ríos, etc.).

Existen multitud de procedimientos operativos para realizar estas medidas, si bien todos ellos pueden agruparse en dos grandes categorías, según sea la forma de incorporación del trazador, el cual se utiliza en forma de una disolución que se inyecta en el caudal a medir. Estas dos formas de proceder son:

1. Medidas con inyección instantánea.

De acuerdo con el esquema de la figura 3.6, considérese una tubería por la que circula un flujo de agua, cuyo caudal Q se quiere medir. En un punto de entrada a la tubería se inyecta, de forma instantánea, una disolución del trazador elegido, con una actividad total A_0 . Aguas abajo del punto de inyección se sitúa el detector y el sistema de medida configurando una geometría determinada, en este caso con el detector adosado a la pared exterior de la tubería.

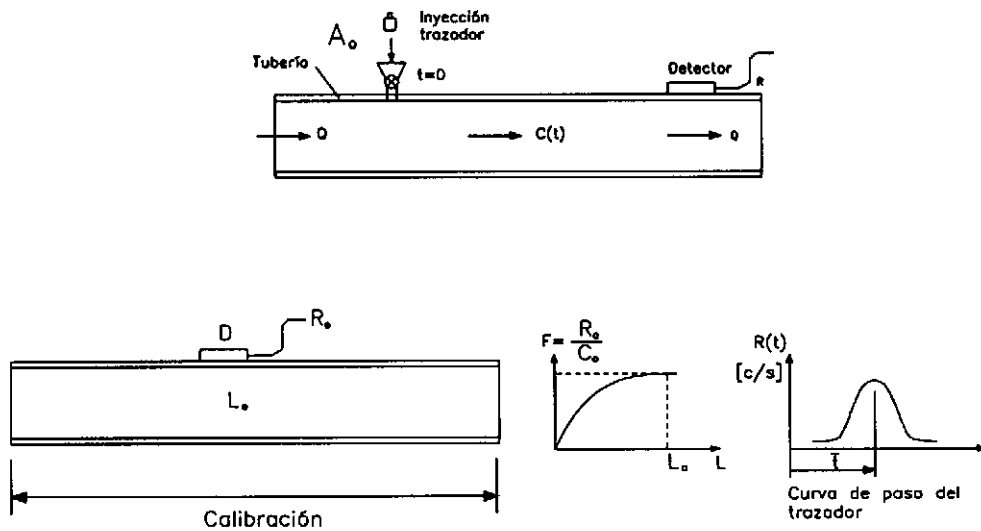


Fig. 3.6 Medida de caudales por el método de inyección instantánea

Si Q es el caudal constante a medir, $C(t)$ la variación en el tiempo de la concentración del trazador en una sección transversal de la tubería (curva de paso), situada aguas abajo de la inyección a una distancia suficiente para que se haya producido una mezcla con una concentración uniforme en dicha sección, y entre los puntos de inyección y medida no existen variaciones del caudal (ni aportaciones ni pérdidas), el balance del trazador conduce a la igualdad

$$A_0 = \int_{t=0}^{\infty} Q C(t) dt, \quad (3.1)$$

lo que proporciona el caudal Q según

$$Q = \frac{A_0}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (3.2)$$

Evidentemente el sistema de detección mide la curva de paso del trazador mediante la magnitud $R(t)$, tasa de recuento en función del tiempo, por lo que se hace necesario haber realizado previamente una calibración que permita relacionar la respuesta del detector con la concentración de trazador realmente existente en la tubería. En este caso, según se muestra en la propia figura 3.6, esta calibración puede hacerse previamente llenando un tramo de tubería, de las mismas características y geometría, con el fluido a una concentración perfectamente conocida C_0 de trazador, obteniendo un tasa de recuento R_0 . La relación $F = R_0/C_0$ es el "factor de calibración", a condición de que la longitud L_0 del tramo de tubería utilizado sea suficientemente grande, de modo que dicho factor no dependa de L .

Conocido el factor de calibración F , la igualdad (3.2) permite escribir

$$Q = \frac{FA_0}{\int_0^{\infty} R(t) dt} = \frac{FA_0}{N} \quad (3.3)$$

donde N son las cuentas netas totales integradas proporcionadas por el detector (área de la curva de paso indicada en la figura 3.6).

No debe olvidarse que el valor de Q tendrá un error asociado debido al carácter aleatorio de las magnitudes que intervienen en su cálculo, que son R_0 y N , puesto que se tiene

$$Q = \frac{R_0 A_0}{C_0 N} \quad (3.4)$$

De acuerdo con la formulación de la propagación de errores, la desviación tipo del caudal, siempre que A_0 y C_0 sean valores sin fluctuación estadística asociada y se puedan despreciar las cuentas del fondo, vendrá dada por

$$\sigma(Q) = Q \sqrt{\frac{1}{R_0 t_0} + \frac{1}{N}} \quad (3.5)$$

donde t_0 es el tiempo de recuento utilizado para la medida de las cuentas por unidad de tiempo R_0 en la calibración.

En esta misma experiencia puede obtenerse el denominado "tiempo de paso del trazador", \bar{t} , de acuerdo con la expresión

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t R(t) dt}{\int_0^{\infty} R(t) dt} \quad (3.6)$$

En el caso de canales o ríos, el detector suele colocarse sumergido en la corriente (geometría de recuento 4π) y la calibración se realiza sumergiéndolo en un recipiente de volumen suficientemente grande.

Las experiencias deben prepararse de forma que los errores asociados al resultado obtenido sean aceptables. En caso contrario será preferible utilizar los métodos convencionales de medida de caudales (molinetes, etc.).

2. Medidas con inyección continua.

Según se muestra en la figura 3.7, en este caso la inyección se realiza de forma continua, con un caudal constante q_0 , derivado con un pequeña bomba a partir de un recipiente donde se ha preparado un volumen grande de disolución del trazador a una concentración conocida c_0 . Transcurrido un tiempo suficiente para que la concentración C en la zona de detección sea ya estacionaria, si no existen variaciones del caudal a medir en el tramo se tendrá

$$q_0 c_0 = (Q + q_0) C = QC \quad (3.7)$$

con lo que el caudal vendrá dado por

$$Q = q_0 \frac{c_0}{C} = \frac{q_0 c_0 F}{R} = \frac{q_0 c_0 R_0}{C_0 R} \quad (3.8)$$

donde R es la tasa de recuento obtenida durante el paso del trazador, y $F = R_0/C_0$ el factor de calibración obtenido de forma similar a la comentada en el caso anterior. Si q_0 , c_0 y C_0 no tienen fluctuación estadística asociada, la desviación tipo del resultado, despreciando el fondo, será

$$\sigma(Q) = Q \sqrt{\frac{1}{R_0 t_0} + \frac{1}{Rt}} \quad (3.9)$$

donde t_0 y t son los tiempos de recuento empleados en la determinación de las tasas de recuento en la calibración y en la experiencia, respectivamente. En este caso, el tiempo de llegada del trazador \bar{t} puede definirse como el que tarda la concentración en alcanzar el 50% del valor máximo estacionario en el punto de medida.

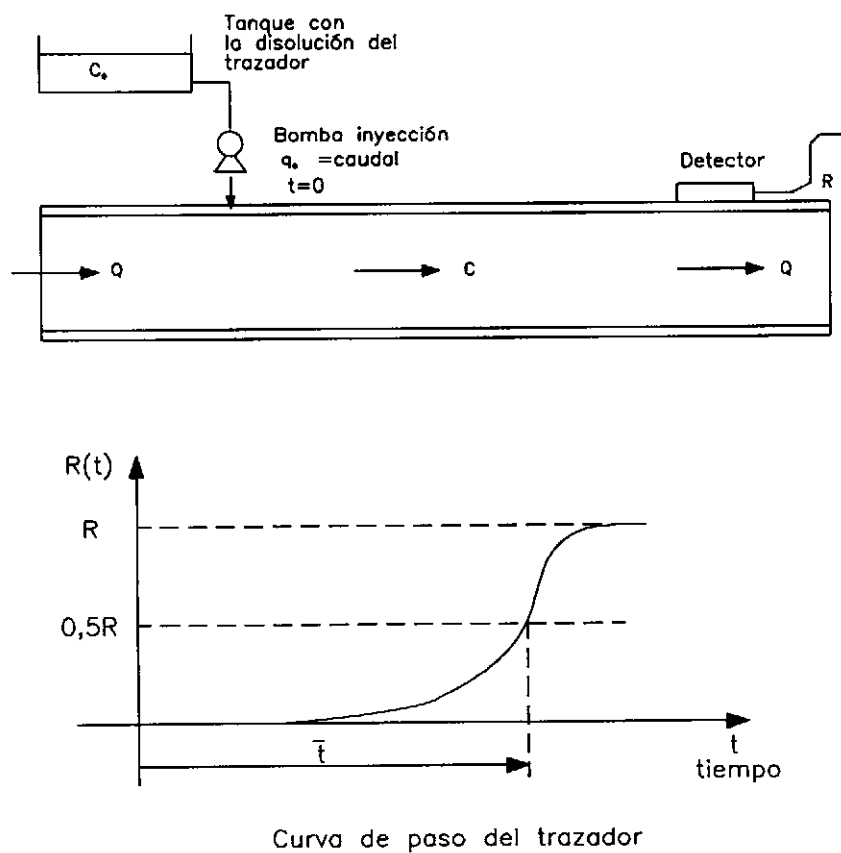


Fig. 3.7 Medida de caudales por el método de inyección continua

3.3 Tipos de aplicaciones de los trazadores radiactivos

Además de la medida de caudales, existen una gran diversidad de aplicaciones de los trazadores radiactivos, siendo de destacar su uso en hidrología superficial y subterránea, campos en los que en España se han realizado un gran número de experiencias de gran utilidad. Esta gran variedad de

aplicaciones, entre las que también se incluye la industria, pueden agruparse según se indica en los siguientes apartados.

3.3.1 Disoluciones de fuentes en líquidos

Con las debidas precauciones, preparando con cuidado las experiencias y efectuando las calibraciones pertinentes, los trazadores permiten resolver los siguientes problemas:

1. **Medida de velocidades.** Con fundamento y técnica similares a las descritas en el apartado 3.2.3 (medida de caudales), puede medirse la velocidad de fluidos en tuberías, canales, etc. Realizando una inyección instantánea, dos detectores situados aguas abajo, a una distancia entre ambos conocida, permiten obtener los respectivos tiempos de paso y, por ende, la velocidad del fluido.

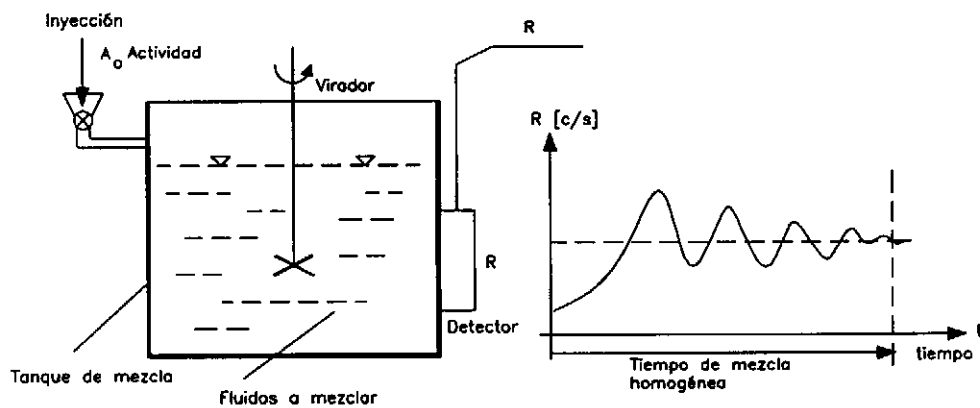


Fig. 3.8 Medida de los tiempos de mezcla de fluidos en recipientes

2. **Medida de tiempos de residencia.** En recipientes y depósitos industriales, especialmente en tecnología química y en embalses, puede medirse el tiempo medio de residencia de una molécula de fluido. En general, se inyecta instantáneamente el trazador a la entrada del sistema y se mide el tiempo de paso del trazador mediante la medida de la curva de paso a la salida.

3. **Medida de tiempos de mezcla.** También de interés en industria (tanques con reactivos que deben mezclarse uniformemente) e hidrología (aguas en embalses). La figura 3.8 ilustra el método utilizado para medir dicho tiempo.

4. Medida de conexiones hidráulicas. De interés en el estudio de posibles fugas de agua en embalses, caracterización del agua de las fuentes y pozos, etc. Es una técnica cualitativa que simplemente detecta la aparición o no de la curva de paso o llegada del trazador en una surgencia, tras haber efectuado inyecciones en puntos alejados aguas arriba.

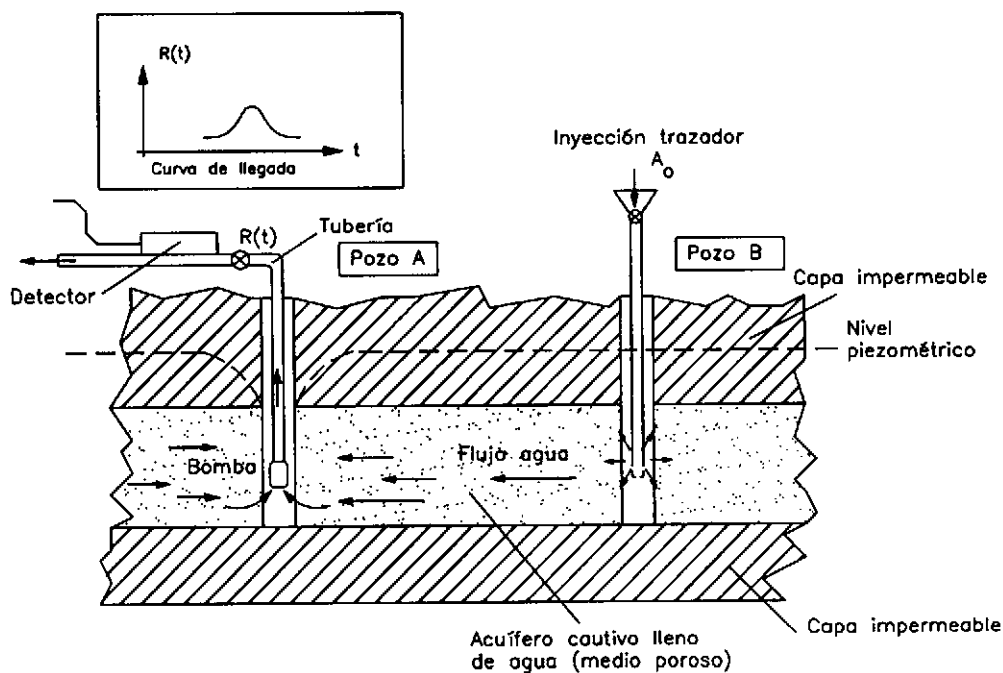


Fig. 3.9 Medida de la porosidad de un acuífero mediante la inyección de un trazador

5. Medidas en hidrología subterránea. Es un campo muy apropiado para el uso de trazadores con el objetivo de determinar características y parámetros de funcionamiento de los acuíferos, que de otra forma serían muy difíciles de determinar. Existe una abundante bibliografía y experiencia al respecto [8], [10]. A modo de ejemplo ilustrativo, veamos cómo puede medirse un parámetro muy característico de un acuífero: la porosidad, es decir, el porcentaje de huecos ocupados por el agua respecto al total del terreno. De acuerdo con el esquema de la figura 3.9, supóngase que se efectúa una inyección instantánea de trazador, con una actividad conocida A_0 , en un pozo o sondeo (B). En otro pozo (A), situado a una distancia R conocida, se coloca una bomba extrayendo un caudal conocido Q , constante mientras dure la experiencia. Un detector situado en la tubería de salida del agua del bombeo permite "ver" la curva de salida del trazador y, en consecuencia, determinar el tiempo de llegada t_p . Si también se conoce el espesor b de la capa acuífera, la porosidad m vendrá dada al igualar el volumen de agua existente en el cilindro de acuífero de radio R con el volumen bombeado durante un tiempo igual al de llegada del trazador, es decir,

$$Qt_p = \pi R^2 b m , \quad (3.10)$$

obteniéndose, por tanto, la porosidad según

$$m = \frac{Qt_p}{\pi R^2 b} . \quad (3.11)$$

El tiempo de llegada vendrá dado por la integración de la curva de paso, de acuerdo con la expresión

$$t_p = \frac{\int_0^\infty t C(t) dt}{\int_0^\infty C(t) dt} = \frac{\int_0^\infty t R(t) dt}{\int_0^\infty R(t) dt} . \quad (3.12)$$

En este tipo de medidas en hidrología subterránea es muy importante [8] una buena selección del trazador más apropiado, evitando aquellos que sean fácilmente adsorbidos o retenidos por el terreno. Asimismo, conviene planificar adecuadamente las experiencias teniendo en cuenta las especiales características de los flujos de las aguas subterráneas, que presentan velocidades muy inferiores a las de las aguas superficiales.

6. Estudio de modelos de flujo y difusión. Los trazadores son una herramienta muy apropiada para la determinación de parámetros o características de sistemas de flujo en fluidos en los estudios de modelización de su comportamiento. Se hacen muchas medidas de velocidades de corrientes marinas (para el proyecto de puertos), de velocidades de flujos de aguas subterráneas, de dispersión de vertidos contaminantes en ríos o en el mar, etc. Las medidas, con detectores sumergidos o sacando muestras, permiten obtener mapas de isoconcentración de los vertidos industriales, de emisarios en el mar, etc.

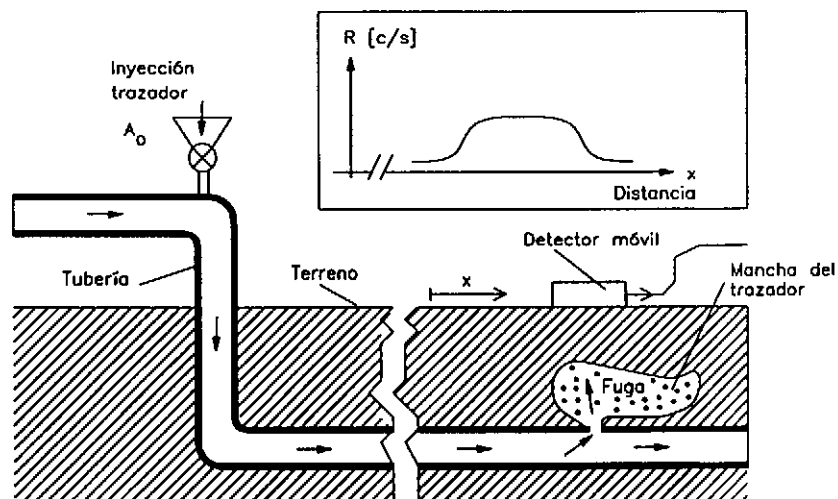


Fig. 3.10 Representación esquemática de la localización de fugas en tuberías enterradas mediante trazadores

7. Detección de fugas. Es una técnica cualitativa de gran utilidad, especialmente para identificar fugas de tuberías con difíciles accesos (tuberías enterradas de los oleoductos, de gas, etc.) o en embalses y lagos. Se inyecta el trazador en el origen del sistema y aguas abajo se planifica una campaña de mediciones para localizar los puntos de fugas, si existen. En la figura 3.10 se esquematiza una experiencia de localización de una fuga en una tubería enterrada. En España se han realizado [10] muchas medidas de fugas de agua en embalses utilizando trazadores radiactivos, especialmente el I-131.

3.3.2 Medidas con fuentes sólidas instaladas

En este grupo de aplicaciones la fuente no es una disolución acuosa del radionucleido, sino que está en forma sólida, marcando compuestos también sólidos. Las aplicaciones más características son las siguientes:

1. Medida de caudales máxicos. Es el caso de la medida de caudales de sustancias sólidas arrastradas por los ríos (en suspensión, arrastre de piedras y cantos, etc.), para lo cual se procede al marcaje de estos materiales, incorporándoles pequeñas cantidades de trazadores. El estudio de las actividades que con el tiempo llegan aguas abajo permite cuantificar los caudales arrastrados, técnica que es una herramienta de gran ayuda en sedimentología. Con estos datos se puede estimar la vida útil de los embalses, es decir, el tiempo que transcurrirá hasta su colmatación por sedimentos. Con este objeto se han utilizado los radionucleidos Sc-46, Ag-110, Cr-51, Au-198, etc.

En la industria se han usado técnicas similares para la medida de la velocidad y caudal de la pasta fundida en los hornos de fabricación de cemento, de vidrio y de coque (en los hornos de coquización). Como radionucleidos se han empleado K-42, Ce-141, P-32, etc.

2. Medida de desgaste. Es una técnica de gran precisión que permite la medida de tasas muy pequeñas de desgaste de piezas sujetas a frotamientos. Se trata de incorporar pequeñas fuentes radiactivas en las piezas en cuestión, o bien proceder directamente a su activación mediante irradiación neutrónica en un reactor nuclear o con fuentes neutrónicas de Po-Be, etc. Una vez incorporado el trazador, en este caso en forma sólida, se procede a hacer trabajar la pieza en sus condiciones habituales. La medida de la posible actividad incorporada en los materiales de erosión generados permitirá conocer cuantitativamente el grado de desgaste, si previamente se han realizado las calibraciones de forma adecuada.

En el caso de desgaste de herramientas (punzones, taladradoras, fresadoras, etc.) se procede a medir la actividad en las virutas del proceso. En otros casos -cojinetes, aros de pistones- se mide la actividad incorporada en el aceite o en la grasa de lubricación. En la figura 3.11 se muestra el esquema de una medida del desgaste de los aros de un pistón de un motor de combustión interna. En las aleaciones metálicas, los radionucleidos generados en la activación neutrónica son: Cr-51, Mn-56, Fe-55, Fe-59, W-181, W-185, W-187, V-52, etc. En cada caso las actividades alcanzadas dependerán de la composición de la aleación, del flujo neutrónico empleado y del tiempo de irradiación. Se pueden

medir fácilmente cantidades inferiores al microgramo. Modernamente también se usan aceleradores de partículas para la activación de capas superficiales delgadas de metales. Utilizando las partículas α aceleradas de 28 MeV se puede activar un espesor metálico de acero de 25 μm con Mn-54. La actividad decrecerá con la profundidad debido a la pérdida de energía de las partículas. Con actividades totales inducidas inferiores a 10 μCi no son necesarias medidas especiales de radioprotección.

En la tuberías enterradas (oleoductos) es bastante común proceder periódicamente a la limpieza empleando un tapón que, impulsado por un fluido a presión, se hace circular por toda su longitud. Para la localización de los atascamientos que a menudo se producen, se utilizan trazadores que marcan inicialmente dicho tapón, lo que permite la localización del atasco usando un detector móvil (en un vehículo), desplazándose sobre el terreno por encima del trazado de la tubería.

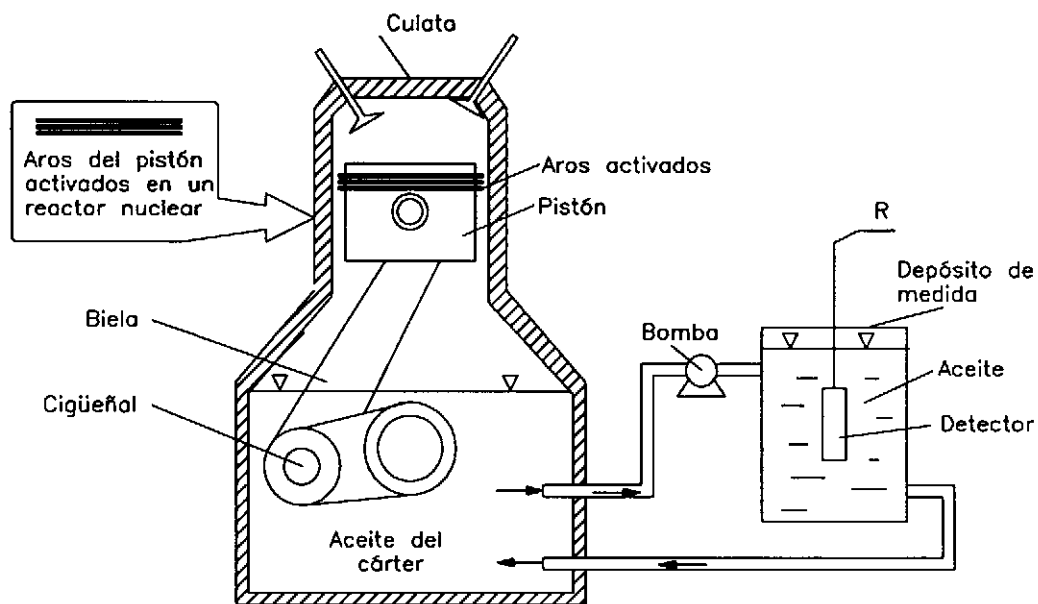


Fig. 3.11 Medida del desgaste de aros de pistones con trazadores radiactivos

En muchas industrias interesa conocer el grado o velocidad de desgaste de los recubrimientos refractarios en hornos. A tal efecto, se puede proceder a incorporar pequeñas fuentes de Co-60 (sólidas), embebidas en el refractario durante su instalación, en lugares de coordenadas perfectamente conocidas. Posteriormente, durante el período de la vida del refractario y de forma periódica, se

efectúan medidas desde el exterior con detectores opuestos a los lugares donde se ubican las fuentes. De la lectura de los detectores se deduce el grado de avance del proceso de desgaste del espesor de la pared del refractario.

En tecnología química, los trazadores radiactivos son también de gran utilidad en el estudio, tanto cualitativo como cuantitativo, de los procesos de desgaste y transferencia de masa en los catalizadores usados en los reactores químicos, en los estudios de corrosión y de incrustaciones en paredes de recipientes, etc. En este tipo de medidas se han empleado Ir-192, Cr-51, Fe-55, Ca-45, P-32, etc.

3.3.3 Otras aplicaciones

A lo largo de la anterior exposición, el lector habrá adivinado la gran cantidad de posibilidades y, por tanto, de aplicaciones de interés que son factibles con el empleo de los trazadores radiactivos. A título de ejemplo y sin ánimo exhaustivo, se citan a continuación otras que se consideran de interés.

1. Medidas con fuentes gaseosas. Con fundamentos similares a las medidas en líquidos, utilizando radionucleidos gaseosos (H-3, Kr-85, Xe-133, etc.), puede medirse:

- La dispersión de efluentes en la atmósfera en estudios de contaminación ambiental.
- Las características del flujo de gas en altos hornos.
- Los parámetros de interés en los estudios de ventilación en edificios (grado de renovación, zonas de estancamiento, etc.).
- Las fugas de gases en tuberías (gas natural, etc.).

2. Aplicaciones en metalurgia. Es también un campo muy propicio al uso de trazadores, para:

- El estudio de la difusión de componentes en las aleaciones, utilizando isótopos del Pb, Nb, S, Ta, etc.
- El estudio de la purificación de metales en las coladas de fundición.
- El análisis de los procesos de solidificación de metales.
- La determinación de los límites de las fases en las coladas continuas.
- El cálculo del volumen o peso de las coladas en hornos.
- El estudio de la trazabilidad (seguimiento) de los materiales.

3. Aplicaciones en química. La investigación en química se ha beneficiado en gran medida del uso de los trazadores en muchas áreas:

- El estudio de la cinética de las reacciones químicas.
- El análisis de los procesos de isomerización y polimerización.
- El estudio de los mecanismos de la fotosíntesis (Calvin).
- El análisis cuantitativo de la cinética y el equilibrio de reacciones químicas.

- El estudio de las reacciones de intercambio químico e isotópico, la localización de átomos en moléculas, enlaces, etc. El marcaje de un átomo, es decir, la sustitución de un átomo estable por un isótopo radiactivo, permite su seguimiento a través de reacciones y cambios de estructura molecular.

3.4 Análisis por dilución isotópica

Es ésta una técnica de análisis cuantitativo bastante extendida en la que se utilizan trazadores radiactivos, y que es muy eficaz en aquellos casos en que hay que determinar cantidades muy pequeñas de algún elemento o compuesto de una muestra. El campo de aplicación es amplio (industria química, metalurgia, radioinmunología, etc.), entrando en franca competencia con los métodos clásicos de química analítica, debido básicamente a la gran sensibilidad de los sistemas de detección de partículas.

3.4.1 Fundamentos

Los balances realizados en los ensayos para la medida de caudales (apartado 3.2.3), así como la sencilla experiencia que sigue, son muy ilustrativos para comprender el fundamento de las técnicas propias de los análisis por dilución de trazadores. Supongamos que se quiere conocer el volumen V de un depósito lleno de agua y de geometría complicada, difícil de cubicar directamente. Para ello, se diluye en el depósito un pequeño volumen v de una disolución de un trazador a una concentración c_0 conocida previamente. Si el depósito no tiene fugas ni aportaciones, después de que el trazador inyectado se haya mezclado uniformemente en el volumen V , el balance del mismo conduce a la igualdad

$$v \cdot c_0 = (v+V) C , \quad (3.13)$$

donde C es la concentración final en el depósito medida con algún sistema de detección apropiado. En general se cumple $v \ll V$, por lo que se tiene

$$V = v \frac{c_0}{C} . \quad (3.14)$$

Al igual que se ha comentado en el caso de las medidas de caudales, es importante realizar de forma conveniente las calibraciones que permitirán obtener las concentraciones de las muestras a partir de las tasas de recuento proporcionadas por los sistemas de detección.

El método se aplica en general en aquellos casos en que se quiere determinar el contenido de sustancias en mezclas, cuando no es posible una separación cuantitativa al 100% en estado puro. Estas separaciones se efectúan, en general, por destilación fraccionada, cristalización fraccionada o

extracción selectiva, procesos en los que se obtiene un separado impuro y un resto no separado.

El principio general que ampara la validez del método estriba en que en las transformaciones químicas no se altera la composición isotópica de cada sustancia si, inicialmente, los isótopos se encuentran en idénticas condiciones químicas y fisicoquímicas. La descripción con cierto detalle de las características del método es ilustrativa respecto a otras aplicaciones similares de los trazadores en análisis.

La metodología consiste en los siguientes pasos: introducción en la muestra de una variación isotópica de un elemento identificable, separación parcial de la sustancia o elemento puro, y medición de la composición isotópica.

Las sustancias a añadir pueden ser:

- Radiactivas. Si la sustancia a determinar es estable o radiactiva.
- Estables. Si la sustancia a determinar es radiactiva.
- Estables con composición isotópica diferente. La composición se obtiene mediante un espectrómetro de masas o por el procedimiento de activación neutrónica.

Dado que se trata de un procedimiento de análisis en el que se trabaja con cantidades muy pequeñas de elementos, es fundamental realizar las calibraciones con la máxima exactitud posible y tener en cuenta una serie de precauciones, tales como:

- Tener un perfecto conocimiento de las sustancias puras.
- Elegir trazadores (radionucleidos) con un período radiactivo adecuado.
- Asegurar la ausencia de reacciones químicas que puedan alterar los balances de materia (reacciones redox, precipitaciones, adsorciones, etc.).
- Asegurar la recuperación (separación) de una parte de la sustancia o elemento en estado puro.
- Realizar las medidas de volúmenes y pesos con mucha precisión.
- Realizar las medidas de actividad (sistemas de detección) con precisión, valorando el error asociado.

3.4.2 Método de la simple dilución isotópica

En esta variante del método debe ser posible obtener una fracción del compuesto o elemento a determinar de la muestra en forma pura, que permita medir su actividad específica (Bq/g). Existen dos formas de proceder:

a) **Dilución directa.** De acuerdo con el esquema de la figura 3.12, si M es la masa de la sustancia estable problema (no radiactiva), m es una cantidad radiactiva pura de la misma con una tasa de recuento específica (por unidad de masa) perfectamente conocida, r , y R' es la tasa de recuento específica de la parte separada en forma pura, el balance de actividad conduce a la igualdad

$$mr = (M+m)R' , \quad (3.15)$$

con lo cual la cantidad problema M valdrá

$$M = m \left(\frac{r}{R'} - 1 \right) = m \frac{r}{R'} , \quad (3.16)$$

siempre que los factores de calibración de las medidas r y R' (relación entre tasas de recuento y actividad) sean los mismos (idéntico sistema de medida).

Al ser, tanto r como R' , cantidades aleatorias sujetas a una fluctuación estadística, la magnitud M , deducida de (3.16), también lo será, y su desviación tipo (error) vendrá dada por

$$\sigma(M) = \frac{mr}{R'} \sqrt{\left(\frac{\sigma(r)}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(R')}{R'}\right)^2} , \quad (3.17)$$

donde $\sigma(r)$ y $\sigma(R')$ son las desviaciones tipo de las tasas de recuento, las cuales pueden expresarse en función del tiempo de recuento, t , obteniéndose

$$\sigma(M) = \frac{mr}{R'} \sqrt{\frac{1}{rt} + \frac{1}{R't}} . \quad (3.18)$$

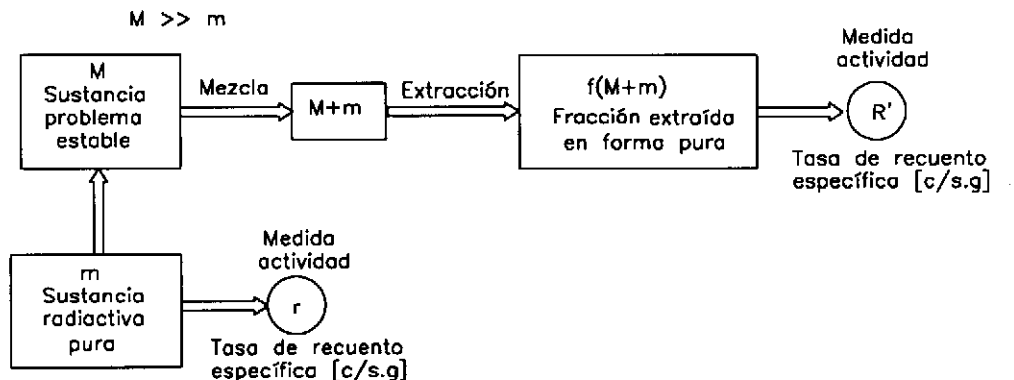


Fig. 3.12 Esquema operativo del método de la simple dilución isotópica directa

En las anteriores expresiones no se ha tenido en cuenta el recuento debido al fondo natural y su error asociado. Una formulación más detallada de (3.17) y (3.18) debería tenerlo en cuenta en el cálculo de $\sigma(r)$ y $\sigma(R')$, caso en el que r y R' serían las tasas netas, es decir, el recuento total menos el del fondo.

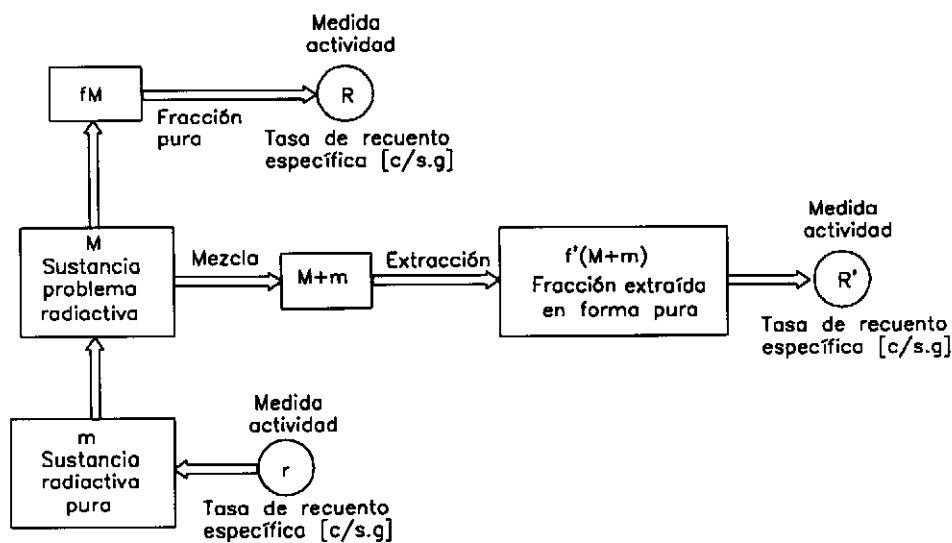


Fig. 3.13 Esquema operacional del método de la simple dilución isotópica inversa

b) Dilución inversa. Según el esquema de la figura 3.13, en este caso también se utiliza una cantidad m de sustancia radiactiva pura, la cual se añade a la muestra que contiene la cantidad desconocida M de sustancia radiactiva problema, con una tasa de recuento específica R , medida previamente tras haber efectuado una extracción de una fracción en forma pura. La medida de la concentración específica de la segunda extracción de otra fracción en forma pura de la muestra, con la cantidad añadida m , proporciona la tasa de recuento específica R' .

Si las medidas de las concentraciones específicas se realizan con el mismo sistema de detección, en idénticas condiciones geométricas, etc. (mismo factor de calibración), el balance de actividad conduce a la igualdad

$$mR + mr = (M + m) R' , \quad (3.19)$$

con lo que se obtiene la cantidad problema

$$M = m \frac{R' - r}{R - R'} \quad (3.20)$$

En el caso particular en que $r = 0$, es decir, la cantidad m añadida lo es de una sustancia estable, se tiene

$$M = m \frac{R'}{R - R'} \quad (3.21)$$

donde la desviación tipo, si no se tiene en cuenta el fondo, es

$$\sigma(M) = \frac{R'}{R - R'} \sqrt{\frac{1}{R't} + \frac{R + R'}{t(R - R')^2}} \quad (3.22)$$

En esta variante del método suele interesar que $m \gg M$, esto es, que se produzca un "arrastre" de la sustancia problema por parte de la añadida.

3.4.3 Método de la doble dilución isotópica

Es un procedimiento apropiado cuando hay que separar un radisótopo y no es posible obtener una fracción en forma pura del mismo. Equivale al caso antes expuesto, pero en el que no es posible tener el valor de R . Existen dos variantes:

a) Con adición de producto inactivo. Según el esquema de la figura 3.14, sea $2M$ la cantidad de elemento radiactivo problema existente en la muestra. Se divide ésta en dos partes, de idéntica masa M , a las que se añaden las cantidades m_1 y m_2 de sustancia o elemento estable, respectivamente. Al ser m_1 y m_2 muy superiores a M , se podrán extraer unas fracciones en forma pura de la sustancia, cuya medida de las actividades específicas proporcionará los valores de las tasas de recuento específicas R_1' y R_2' . Utilizando los mismos sistemas de detección, el balance de actividad conduce a la igualdad

$$(M + m_1)R_1' = (M + m_2)R_2' \quad (3.23)$$

obteniéndose la mitad de la cantidad inicial problema según

$$M = \frac{m_2 R_2' - m_1 R_1'}{R_1' - R_2'} \quad (3.24)$$

Interesa, para tener un buen "arrastre", que se verifique $m_1 \gg m_2 \gg M$.

La formulación de la propagación de errores proporcionará el valor de la desviación tipo asociada a la cantidad obtenida $\sigma(M)$.

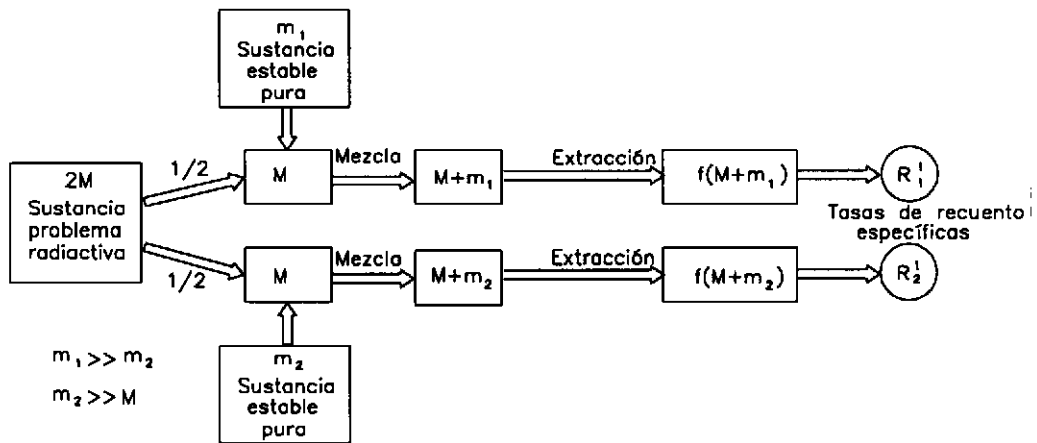


Fig. 3.14 Esquema operacional del método de la doble dilución isotópica con adición de producto inactivo

b) **Con adición de producto radiactivo.** Supóngase el caso de una muestra conteniendo dos sustancias estables, A y B , imposibles de separar químicamente, cuyas cantidades quieren conocerse. Siguiendo el esquema indicado en la figura 3.15, sea $2M$ la cantidad inicial presente de una de las dos sustancias, por ejemplo, B . Se divide la masa total de la muestra en dos partes exactamente iguales.

A cada parte se le añaden respectivamente las cantidades m_1 y m_2 de B^* (B en su forma radiactiva, cumpliendo $B^* \ll B$), con actividades totales a_1 y a_2 y tasas de recuento específicas r_1 y r_2 . Si denominamos f a la fracción peso A /peso $(A+B)$ en la muestra, R a la tasa de recuento específica de B puro, que es desconocida, y R_1' y R_2' a las tasas de recuento específicas de la mezcla de $A+B$ en cada parte, se cumplirá

$$\frac{R'}{R} = \frac{\frac{a}{A+B+B^*}}{\frac{a}{B+B^*}} = \frac{B+B^*}{A+B+B^*} \approx \frac{B}{A+B} = f. \quad (3.25)$$

En cada una de las dos medidas, si se usa el mismo sistema de detección, el balance de actividad de B conduce a la igualdad

$$mr = (M+m)R \quad (3.26)$$

Teniendo en cuenta (3.25), se tendrá

$$mrf = (M+m)R' \quad (3.27)$$

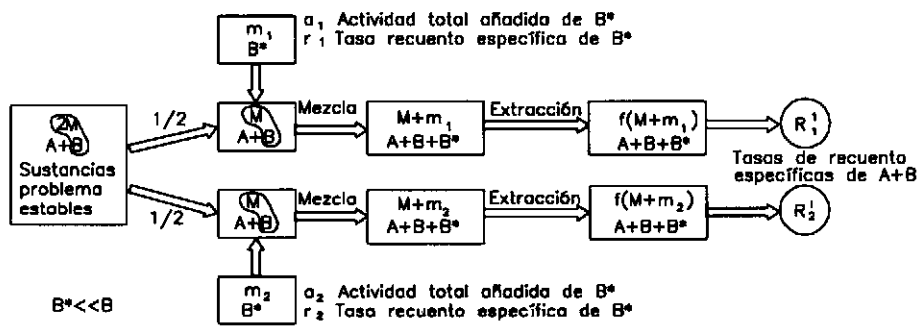


Fig. 3.15 Esquema operacional del método de la doble dilución isotópica con adición de producto radiactivo

Aplicando (3.26) y (3.27) a cada parte y eliminando f , se obtiene la mitad M de la cantidad problema de B , según

$$M = \frac{m_1 m_2 (R_2' r_1 - R_1' r_2)}{m_2 R_1' r_2 - m_1 R_2' r_1} \quad (3.28)$$

La teoría de errores permite hallar el error o la desviación tipo $\sigma(M)$ asociado a esta cantidad.

Existen dos casos particulares de interés:

b.1) Actividades iguales. Si $a_1 = a_2$, se cumple $m_1 r_1 = m_2 r_2$ y la ecuación (3.28) se convierte en

$$M = \frac{m_1 R_1' - m_2 R_2'}{R_2' - R_1'} \quad (3.29)$$

b.2) Actividades específicas iguales. Si $r_1 = r_2$, se tiene

$$M = \frac{m_1 m_2 (R_2' - R_1')}{m_2 R_1' - m_1 R_2'} \quad (3.30)$$

Ejemplo

Veamos el siguiente ejemplo de aplicación del método. Se desea determinar el contenido en fósforo de un fertilizante fosforado, utilizando el método de simple dilución isotópica directa con el radisótomo P-32, en disolución.

Las etapas serán las siguientes:

- 1 - Proceder a la disolución del fertilizante con ácido.
- 2 - Tomar 5 ml de la disolución obtenida.
- 3 - Añadir 1 ml de disolución con el trazador P-32 a esos 5 ml.
- 4 - Efectuar la extracción de una fracción pura de fósforo de la disolución mediante precipitación del mismo, en forma de PO_4MgNH_4 .
- 5 - Medida de la actividad (tasa de recuento específica) del precipitado puro, obteniendo una tasa de recuento $R = 44,5$ c/min.mg.
- 6 - Para la aplicación de la igualdad (3.16), es necesario conocer la cantidad mr (actividad de radisótomo vertida). Ello puede hacerse tomando de nuevo 5 ml de una disolución preparada al efecto con una concentración en fósforo de 10 mg/ml, es decir, con un total de 50 mg de fósforo.
- 7 - Se aplica de nuevo el método de simple dilución de la muestra, añadiéndole 1 ml de disolución con el trazador P-32.
- 8 - El precipitado de esta nueva muestra proporciona una tasa de recuento específica de 24,2 c/min.mg.
- 9 - La aplicación de 3.16 proporciona el valor de la actividad del trazador, según

$$M_2 = m \left(\frac{r_2}{R_2'} - 1 \right) \approx m \frac{r_2}{R_2'}$$

$$mr_2 = M_2 R_2' = 50 \cdot 24,2 = 1210 \text{ c/min} .$$

- 10 - Finalmente, una nueva aplicación de (3.16) a la dilución inicial permite obtener la cantidad de fósforo, según

$$M_i = m \left(\frac{r_i}{R_i} - 1 \right) \approx m \frac{r_i}{R_i} = \frac{1210}{44,5} = 27,19 \text{ mg ,}$$

lo que representa una concentración de $27,19/5 = 5,44$ mg/ml.

Bibliografía

- [1] OIEA. "*Food Irradiation*". Viena, 1966.
- [2] OIEA. "*Radiation Preservation of Food*". Viena, 1973.
- [3] OIEA. "*Requirements for the Irradiation of Food on a Commercial Scale*". Viena, 1975.
- [4] OIEA. "*Food Preservation by Irradiation*". Viena, 1978.
- [5] COLL, P. "*Las plantas industriales de irradiación*". Barcelona. Apuntes de la asignatura Radisótopos y sus Aplicaciones. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, 1978.
- [6] EICHHOLZ, G.G. (editor). "*Radioisotope Engineering*". Nueva York. Marcel Dekker, 1972.
- [7] GARDNER, R.P.; ELY, R.L. "*Radioisotope Measurement Application in Engineering*". Nueva York. Reinhold Publishing Corp., 1967.
- [8] CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. ed. "*Hidrología subterránea*". Barcelona. Omega, 1976.
- [9] COLL, P. "*Fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica*". Barcelona. Edicions UPC, 1990.
- [10] PLATA, A. "*Isótopos en hidrología*". Madrid. Alhambra, 1972.