

Aplicaciones industriales de las radiaciones: equipos, instalaciones, prácticas y seguridad

*Álvaro Vázquez**

1. Introducción

El uso de fuentes de radiación en aplicaciones industriales es una práctica usual en todo el mundo y cubren una gama muy amplia de aplicaciones, entre los que se destacan la medición de parámetros de procesos, la radiografía industrial y la irradiación de productos o materiales. En las publicaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica – OIEA se encuentran descripciones específicas de los usos en la industria especialmente en radiografía industrial y en irradiadores industriales.

En base a la experiencia internacional sobre el tema y con el objetivo de asegurar un adecuado control radiológico de estos usos, se consideró la necesidad de implementar a nivel nacional una infraestructura de control regulador de estas fuentes de radiación. Para ello era necesario contar con una legislación apropiada, un sistema de licenciamiento y fiscalización, el control de la importación de materiales radiactivos y previsiones para el almacenamiento y gestión de las fuentes radiactivas en desuso. Estas condiciones se dieron en Uruguay

que cuenta con una Autoridad Reguladora técnicamente independiente, creada en la Ley de Presupuesto Nacional 17930 de diciembre de 2005, siguiendo las recomendaciones de la OIEA.

La utilización de fuentes de radiación industriales se ha generalizado y si bien sus usos dependen del grado de desarrollo de cada país, es factible encontrar instalaciones de este tipo en los países con menor desarrollo.

En este artículo describiremos las prácticas, analizaremos los

* Médico Oncólogo Coordinador de la Maestría en Mastología del Centro de Ciencias Biomédicas de la Universidad de Montevideo; Coordinador del Centro Oncológico del Norte – Hospital de Tacuarembó

riesgos radiológicos de este tipo de instalaciones y las características de los programas de protección necesarios para la seguridad radiológica de las fuentes de radiación que se desarrollan en nuestro país: fuentes radiactivas encapsuladas en medidores industriales; fuentes radiactivas encapsuladas en gamma grafía industrial y fuentes de radiación en irradiadores industriales.

2. Medidores industriales

La medición de diferentes parámetros (nivel, espesor, densidad, humedad, etc.) de procesos industriales en una planta donde se procesan materiales sólidos, líquidos, o en forma de pellets, se basa en la medición de la intensidad de radiación dispersada o transmitida por los referidos materiales. La radiación es emitida por una fuente radiactiva encapsulada (y alfa, β beta o de neutrones), que forma parte del sistema de medición. En el caso de medición de radiación transmitida, la intensidad del campo de radiación sobre el detector depende tanto de la densidad superficial del material interpuesto en la dirección del haz (la densidad superficial es el producto de la densidad ρ del material por el espesor x del mismo), incluyendo las paredes de cualquier recipiente que contenga al material.

En los medidores de nivel, por ejemplo, si la densidad superficial es elevada se utilizan típicamente fuentes γ de Co^{60} o de Cs^{137} , en caso contrario se utilizan fuentes β de Sr^{90} , Pm^{147} ó Kr^{85} . Los períodos de semi-desintegración de dichos radioisótopos, aseguran que no sea necesario cambiar frecuentemente

las fuentes, lo que resulta apropiado para estas instalaciones industriales.

Los medidores de densidad y humedad de suelos, son equipos portátiles de uso común. Las fuentes de radiación gamma y de neutrones, además de los propios detectores, están instalados en la base del equipo y miden por retrodispersión producida por el suelo.

Las tasas de dosis equivalentes ambientales medidas en contacto con las superficies accesibles del cabezal, no suelen superar los $500 \mu\text{Sv/h}$, $50 \mu\text{Sv/h}$ y $100 \mu\text{Sv/h}$, para radiación γ , β y de neutrones respectivamente.

En nuestro país, las industrias de la bebida que miden los niveles de los líquidos, la planta de celulosa ubicada en Río Negro que mide densidad y la Dirección de Vialidad que mide densidad y humedad de suelos, poseen medidores industriales.

Las dosis efectivas anuales estimadas en los lugares de trabajo en operación normal resultan inferiores a las dosis recibidas por la exposición al fondo natural de radiación.⁽¹⁾

Los equipos fijos suelen estar ubicados en zonas de muy bajo factor de tránsito u ocupación y las tareas que implican el acceso al interior de recipientes, que podrían ser la causa de una exposición al haz de radiación del cabezal, son esporádicas y de corta duración.

Las tasas de dosis equivalente ambiental en los lugares de trabajo se encuentran en el or-

den de $10 \mu\text{Sv/h}$ en las operaciones normales y similares son las consideraciones para el uso de los equipos medidores portátiles de humedad.

La Autoridad Reguladora es responsable del cumplimiento por parte de los usuarios de los requisitos establecidos en la norma UY 116.

3. Gammagrafía industrial

La gammagrafía industrial es una técnica de Ensayos No Destructivos (END) de uso extendido en el mundo, necesaria para estudiar la integridad y calidad de soldaduras, del material de tuberías, tanques, piezas metálicas diversas, entre otros. Su uso es intensivo durante la construcción de grandes piezas metálicas, en el montaje de plantas industriales, en el tendido de oleoductos y durante el mantenimiento de las mencionadas instalaciones, a lo que se agrega el estado de estructuras de hormigón armado en las construcciones.

Se trata de equipos robustos que pueden instalarse prácticamente en cualquier sitio, con un procesamiento de las placas radiográficas muy sencillo y una técnica que es muy confiable. Durante la práctica se coloca una fuente de radiación cerca del objeto que será estudiado y se obtiene una radiografía del mismo y la atenuación diferencial que producen los defectos de las soldaduras o del volumen de la pieza, se traduce en las placas radiográficas. Actualmente y casi exclusivamente se utilizan fuentes radiactivas encapsuladas de Ir^{192} y de Co^{60} ,

siendo poco utilizadas las fuentes de Cs¹³⁷.

El equipo de gammagrafía portátil típico, también denominado cámara o proyector, cumple funciones de contenedor de blindaje y de transporte. El blindaje propiamente dicho está ubicado en el centro del equipo, y posee un canal que lo atraviesa y por el que se desplaza la fuente cuando debe efectuarse una exposición gammagráfica. Hay diferentes modelos de equipos, con canal recto ó curvo, de lo que depende el tipo de mecanismo de traba y fijación de la fuente. El “cable de arrastre” con una unidad de control remoto o dispositivo tipo “manivela” permite mover la misma para su operación remota. Este cable se sujeta al extremo o “cola” de la fuente, la que asoma desde el equipo en la zona donde se halla el mecanismo de traba.

Este cable de arrastre está contenido dentro de un tubo metálico flexible denominado “tubo guía de arrastre” que se compone de varios tramos unidos y que posee sendas conexiones roscadas que deben ser conectadas por un lado al mecanismo de manivela y por el otro a la cola de la fuente.

Se utiliza otro tubo metálico flexible también compuesto de varios tramos unidos, denominado “tubo guía de fuente”, el que se conecta al extremo opuesto del equipo. Durante la operación, la fuente es arrastrada desde su posición dentro del blindaje hasta el extremo cerrado del tubo guía de fuente, el que ha sido colocado exactamente en el punto donde se debe efectuar la radiografía.

La fuente radiactiva está contenida dentro de una cápsula cerrada que está montada en un extremo de un conjunto denominado porta-fuente, el que posee un conector rápido en su otro extremo. En el caso de los equipos de canal curvo, el porta-fuente consiste en la fuente encapsulada unida al conector por medio de un cable flexible de acero, mientras que en los modelos de canal recto la cápsula de la fuente y el conector son parte de un conjunto recto rígido de uranio o tungsteno que actúa como blindaje. El cable de arrastre debe ser enganchado a la fuente mediante un conector rápido “macho”, que se conecta al correspondiente conector “hembra” que forma parte del conjunto del porta-fuente.

La seguridad radiológica en los recintos blindados que se utilizan para gammagrafía industrial, presenta características muy similares a las halladas en las prácticas de telecobaltoterapia o incluso en las plantas de irradiación industrial: cuando no está en uso, la fuente queda depositada dentro de un blindaje en el propio recinto, del cual es extraída para efectuar la radiografía y luego retorna al blindaje mediante mecanismos mecánicos o neumáticos remotos; los sistemas de seguridad están diseñados para brindar seguridad intrínseca a la instalación, destacándose la presencia de enclavamientos para el retorno automático de la fuente a su blindaje en caso del ingreso de personas al recinto durante una irradiación, así como para evitar el inicio de una irradiación si permanece alguna persona dentro de él; las señalizaciones en el acceso

al recinto y en el pupitre de comando son luminosas y sonoras y pueden existir monitores de área dentro del recinto que controlan entre otros la posición de la fuente.⁽¹⁾

Las operaciones de gammagrafía con equipos móviles o portátiles presentan características particulares y son responsables de buena parte de los accidentes en la industria nuclear. Las tasas de dosis producidas por una fuente radiactiva de gammagrafía fuera de su blindaje son elevadas (48 cGy/h a 1 metro de distancia de una fuente de 3,7 TBq de Ir¹⁹²), y durante las operaciones la fuente debe ser extraída de su blindaje cada vez que se realiza una radiografía. Las dosis efectivas anuales recibidas por los operadores en condiciones normales de operación, dependen de la carga laboral y del estado del equipamiento utilizado, pero no suelen superar 4 mSv por año.

Es imprescindible que los equipos y sus accesorios incorporen criterios de seguridad adecuados y estrictos. En nuestro país, las normas UY 101 y 110 rigen los mismos y son varias las empresas privadas que brindan el servicio de radiografía industrial así como ANCAP para su uso propio.

Los procedimientos de trabajo deben incluir instrucciones precisas para la verificación periódica y el mantenimiento de los accesorios (unidad de control, cable de arrastre, tubos guía, acoples, colimador), de los respectivos conectores, del mecanismo de traba de la fuente dentro del equipo, de la chapa identificatoria del material radiactivo, sien-

do fundamental mantener en óptimo estado de funcionamiento los equipos de radioprotección del personal.

El personal debe delimitar y señalar apropiadamente el área de trabajo. Los límites del área deben establecerse teniendo en cuenta los factores de uso y de ocupación del lugar, y deben asegurar que las dosis que reciba el público no superen las restricciones de dosis que estipule la Autoridad Regulatoria para la práctica. Las dosis equivalentes ambientales en el perímetro del área pueden ser de $7,5 \mu\text{Sv/h}$.⁽²⁾

Los equipos portátiles de gammagrafía suelen estar expuestos a golpes, roturas, desgaste y a la acción de factores ambientales adversos. En muchos países, la práctica se desarrolla bajo la presión de cronogramas de trabajo muy ajustados y el personal de operación suele tener una preparación técnica y una formación cultural escasas. Depende de la Autoridad Reguladora el llevar a cabo las acciones necesarias para fomentar una Cultura de la Seguridad a nivel nacional.

4. Irradiación industrial

Los procesos inducidos en la materia por efectos de las radiaciones ionizantes, son aplicados en numerosos campos de la ciencia y de la producción, constituyendo una tecnología que ofrece ventajas relativas en comparación con metodologías convencionales. Esta tecnología se utiliza para la preservación de alimentos, esterilización de productos médicos, cosméticos y farmacéuticos, modificación de

estructuras de polímeros, erradicación de plagas de insectos, entre otros usos.⁽³⁾

En las aplicaciones de esterilización o preservación, el producto debe ser expuesto a dosis elevadas de radiación sin que ello afecte sensiblemente sus propiedades esenciales. En cambio, en el caso de tratamientos para polimerización inducida, modificación de estructuras, se intenta obtener una modificación sustancial de determinadas propiedades de los productos tratados. Las energías de los campos de radiación utilizados son insuficientes para activar los núcleos atómicos del material irradiado, pero alcanzan para producir la ruptura de uniones entre átomos de las moléculas del medio, creándose radicales libres que son responsables de los procesos mencionados.

En el mundo hay cientos de instalaciones de irradiación, algunas utilizan campos de radiación gamma y otras aceleradores de electrones. Hay irradiadores integralmente blindados en los que la fuente de radiación es inaccesible a los operadores y otros en que la fuente puede ser accesible a los mismos, implementándose sistemas de seguridad para prevenir accidentes.⁽²⁾

El desempeño de las plantas de irradiación ha sido bueno desde el punto de vista de la seguridad radiológica, pero han ocurrido accidentes con víctimas fatales. Las fuentes de radiación de estas instalaciones producen tasas de dosis muy elevadas durante la irradiación, lo que hace esencial las medidas de seguridad.

Si a pesar de los sistemas de seguridad propios de la instalación, una persona ingresa al recinto durante la irradiación, recibirá una dosis por encima del umbral de efectos determinísticos en cuestión de instantes, con consecuencias eventualmente letales.

El ingreso al recinto de irradiación para los productos que deben ser irradiados genera, entre otros, riesgos de incendio en el caso de un calentamiento excesivo de los mismos pudiendo también provocar interferencias mecánicas con los mecanismos de movimiento de la fuente de radiación.

En el caso particular de los irradiadores gamma, el diseño de los sistemas y de las propias fuentes encapsuladas debe prevenir el riesgo de contaminación minimizando la posibilidad de que éstas sean dañadas mecánicamente, por corrosión o por efectos de un incendio.

El diseño y la operación de este tipo de instalaciones, debe tener en cuenta todos estos aspectos de seguridad. El solicitante de una autorización para la operación de un irradiador industrial debe demostrar a la Autoridad Reguladora que el diseño cumple como mínimo con los requisitos establecidos en las normas de aplicación, teniendo en cuenta tanto la operación normal como las exposiciones potenciales y que la organización que operará el irradiador tendrá los medios materiales y el personal capacitado para cumplir con los requisitos de seguridad establecidos para la operación. Deben existir pro-

cedimientos claramente establecidos para tomar acciones a fin de minimizar las dosis que se puedan recibir en el caso de: falla de enclavamientos; traba del sistema de movimiento de la fuente; pérdida de agua de la pileta; pérdida de confinamiento de fuentes e incendio y explosión.⁽⁴⁾

Las normas a considerar en este caso, el de mayor riesgo radiológico potencial van desde la UY 111 a la 115. La Autoridad Reguladora se encarga de vigilar y controlar su cumplimiento, implementando procedimientos para controlar la construcción, puesta en marcha, operación y desmantelamiento de estas instalaciones. En Uruguay en octubre de 2009, está en proceso de licenciamiento e instalación, el primer irradiador industrial de tipo II, que habrá de funcionar en el predio del LATU.

El OIEA recomienda la implementación de ciertos principios de diseño para alcanzar un grado aceptable de seguridad en estas plantas:

- **Defensa en profundidad:** Este concepto debe aplicarse a todas las actividades relacionadas con la seguridad, de forma que si ocurre una falla con alguna de las provisiones de seguridad será compensada o corregida. Para ello se deben implementar entre otras acciones, niveles múltiples de protección (control de accesos al recinto, blindajes, etc.), con la mínima necesidad de intervención humana (enclavamientos automáticos de seguridad).

- **Redundancia:** Debe disponerse de un número de elementos mayor que el mínimo necesario para llevar a cabo una función de seguridad determinada. Esto aumenta la confiabilidad del sistema, pues permite tolerar la falla o indisponibilidad de alguno de los elementos de seguridad.

- **Diversidad:** Este concepto se aplica a sistemas o elementos de seguridad redundantes, que realizan la misma función, incorporándoles diferentes atributos (diferentes principios de operación, diferentes variables físicas, diferentes condiciones de operación, diferentes fabricantes, entre otros). La confiabilidad del sistema aumenta si hay diversidad, pero debe tenerse en cuenta eventuales complicaciones operativas o de mantenimiento que pudieran surgir como consecuencia de la introducción de elementos diversos.

Las fuentes radiactivas que se utilizan en estas plantas, deben haber sido diseñadas según normas internacionales reconocidas teniendo en cuenta posibles efectos de fuego, explosión o corrosión. En el caso de almacenamiento de la fuente en pileta de agua como sucede con los irradiadores tipo IV, deben tenerse en cuenta los problemas derivados de la eventual corrosión de la cápsula externa de las fuentes y debe limitarse la fatiga térmica seleccionando apropiadamente los materiales de las mismas. En tal caso, el material radiactivo debe tener una forma física insoluble en agua a fin de

minimizar las consecuencias de una pérdida de confinamiento de las fuentes (no es recomendable el uso de Cs¹³⁷ pues para este tipo de fuentes el material se presenta en forma de cloruro que es altamente soluble en agua).

5. Tipos y clasificación de los irradiadores industriales ⁽⁵⁾

Categoría I

La fuente sellada está completamente encerrada en un contenedor seco construido de materiales sólidos y blindados en todo momento, siendo el acceso humano a la fuente sellada y al volumen bajo irradiación físicamente imposible para la configuración diseñada.

Categoría II

La fuente sellada está encerrada en un contenedor seco construido de materiales sólidos, blindado totalmente cuando no está en uso y expuesto dentro de un volumen que se mantiene inaccesible durante el uso por un sistema de control de entrada, siendo el acceso humano controlado.

Categoría III

La fuente sellada está en una piscina de almacenamiento llena de agua y blindada en todo momento, siendo el acceso humano restringido a la fuente sellada y al volumen bajo irradiación, por la configuración diseñada y el modo apropiado de uso.

Categoría IV

La fuente sellada está en una piscina de almacenamiento lle-

na de agua y blindada totalmente cuando no está en uso y es expuesta dentro de un volumen que se mantiene inaccesible durante el uso por un sistema de control de entrada, siendo el acceso humano controlados.

Los objetivos de la seguridad radiológica para la operación normal, en este tipo de instalaciones y el desmantelamiento final tienen en cuenta que las dosis que reciban los trabajadores y el público deben ser tan bajas como sea posible teniendo en cuenta factores económicos y sociales, no pudiendo superar los límites establecidos por la Autoridad Reguladora.

El personal de operación debe llevar dosímetros personales, cuyas lecturas deben registrarse periódicamente. La experiencia indica que las lecturas mensuales no superan en condiciones normales el límite de detección de los sistemas de dosimetría utilizados y debe efectuarse un monitoreo del área toda vez que se produzca un cambio importante en el inventario de material radiactivo en la instalación.⁽¹⁾

El procedimiento de operación posee una secuencia estricta de acciones que el personal debe ejecutar en tiempo y forma. Para poder izar la fuente radiactiva de irradiación o permitir la alimentación del acelerador si fuera el caso, debe accionar una llave especial dentro del recinto para asegurarse que no permanezcan personas dentro de él, salir del recinto rápidamente, cerrar la puerta de acceso, y encender la máquina con la misma llave desde la consola de comando dentro de un número espe-

cificado de segundos para que el equipo quede listo para irradiar. Si alguno de los pasos no se cumple apropiadamente, debe reiniciarse nuevamente toda la secuencia.⁽⁶⁾

El acceso inicial al recinto de irradiación después de finalizada una operación, debe ser efectuado por un técnico calificado utilizando un monitor portátil de radiación para determinar los niveles de la misma en el ambiente. Si se permite el acceso de visitantes al recinto, deben ser acompañados por personal calificado y con la supervisión previa del lugar.

La capacitación y entrenamiento del personal de operación y mantenimiento de estas plantas, reviste una importancia primordial para la seguridad de la instalación. La Autoridad Reguladora dicta normas para el licenciamiento del personal de aquellas instalaciones que sean relevantes para la seguridad radiológica.

La seguridad de la instalación depende fuertemente del mantenimiento y de las pruebas periódicas de los sistemas de seguridad y en particular se recomienda: pruebas de todos los enclavamientos de seguridad, a intervalos regulares; exámenes periódicos de los cables de sostén y de guía de la fuente de irradiación, en plantas de irradiación gamma con fuente depositada bajo agua (los cables deben ser reemplazados de acuerdo a lo establecido por las regulaciones o por el fabricante); ensayos periódicos para detectar pérdidas de las fuentes radiactivas y pruebas de los monitores portátiles de radia-

ción, a intervalos regulares o después de cualquier reparación.

La Licencia de Operación de la instalación establece límites y condiciones de funcionamiento autorizados. Los manuales, forman parte de la documentación de carácter mandatoria aprobada para la operación segura de la planta.

Algunas pruebas recomendadas son por ejemplo de: Frecuencia semanal (enclavamientos de accesos al recinto de irradiación, monitor de área en el recinto de irradiación, monitor de radiación en la puerta de salida del producto, botón de corte de emergencia en consola de control, botón de corte de emergencia dentro del recinto de irradiación, control del nivel de agua en pileta).

Toda modificación de los sistemas, componentes y procedimientos de trabajo que sean de importancia para la seguridad de la instalación (sistema de enclavamiento de seguridad, mecanismo de movimiento de la fuente, procedimientos de recambio o redistribución de fuentes radiactivas, cambios en el organigrama de personal), debe ser efectuada por personal calificado y solo con la autorización previa de la Autoridad Reguladora. En el caso de desperfectos de los equipos o componentes importantes para la seguridad, deben estar claramente establecidos los procedimientos escritos que detallen las personas que deben ser notificadas del problema.

Es fundamental la implementación de sistemas que impidan que personas no autorizadas in-

gresen al recinto de irradiación o alcancen las llaves de la consola de control.⁽⁷⁾

6. Fuentes radiactivas encapsuladas

Las fuentes radiactivas que se utilizan en la mayor parte de los usos industriales, están contenidas dentro de una cápsula cerrada estanca o poseen una capa protectora que las cubre para evitar que el material radiactivo, dentro de las condiciones de uso para las que fue diseñada la fuente, entre en contacto con

las personas o se disperse en el medio ambiente. Estas fuentes reciben el nombre genérico de “Fuentes encapsuladas”.

La cápsula o la capa protectora de este tipo de fuentes están fabricadas con materiales no radiactivos y están diseñadas para que, dentro de un ángulo sólido dado, atenúen lo menos posible la radiación emitida por la fuente. Como consecuencia del uso cada vez más extendido de las fuentes encapsuladas en todo el mundo, se hizo necesario disponer de una norma para especificar

y clasificar tanto las características de este tipo de fuentes, como los métodos para someterlas a ensayos de desempeño y de seguridad representativos de las exigencias a las que estarían expuestas las fuentes.

Todas las prácticas descritas van creciendo en su utilización a lo largo y ancho del mundo, quizás en un futuro próximo nuestro país también tome mayor protagonismo en el desarrollo de las mismas. ■

Bibliografía

1. Organismo Internacional de Energía Atómica. “Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación”. OIEA, Viena. (1997). Colección Seguridad no. 115. STI/PUB/996.
2. Organismo Internacional de Energía Atómica. Recommendations for the Safe Use and Regulation of Radiation Source in Industry, Medicine, Research and Teaching. Safety Series N° 102. Vienna.
3. Organismo Internacional de Energía Atómica. Irradiation to Ensure the Safety and Quality of Prepared Meals. STI/PUB/1365. Abril 2009. Vienna.
4. Organismo Internacional de Energía Atómica. Radiation safety of non-medical irradiation facilities. IAEA TECDOC 1367. Vienna 2003.
5. Organismo Internacional de Energía Atómica. Manuales sobre Medidores Nuclear e Irradiadores Gamma (categorías I a IV). Aplicaciones. Procedimientos. Fundamentos. Viena 1993.
6. International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. (1991).
7. Curso de Protección Radiológica. Aplicaciones Industriales de las Radiaciones. Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina. Edición 2007.