



**USOS DE LAS RADIACIONES:** En muchos sentidos, las tecnologías de las radiaciones redundan en beneficios prácticos para la industria. Por ejemplo, su uso está ayudando (de derecha a izquierda a partir de la foto superior izquierda) a determinar el contenido de cenizas y minerales del carbón; esterilizar productos médicos como medida de higiene; analizar la calidad de las soldaduras; garantizar la seguridad de las tuberías; y conservar los alimentos.

*Página de enfrente:* En la industria energética se utilizan diversas tecnologías de las radiaciones para evaluar reservas potenciales de petróleo y gas. (Cortesía: AECL; Ontario Hydro; Sodel hotothèque EdF; ANSTO; CEA)



# Aplicaciones nucleares y de las radiaciones en la industria: Instrumentos innovadores

*Evaluación general de las tecnologías de las radiaciones y sus diversos usos*

por S. Machi y R. Iyer

**D**urante muchos años el uso de las tecnologías nucleares y de las radiaciones ha contribuido a la eficiencia industrial, la conservación de la energía y la protección del medio ambiente.

Entre las aplicaciones prácticas en la industria se cuentan:

**Industrias manufactureras:** Las tecnologías de tratamiento por irradiación están participando cada vez más en la elaboración de productos de uso corriente como alambres y cables, neumáticos para automóviles, revestimientos y láminas de plástico y materiales de superficie.

**Procesos de producción:** Otras técnicas que utilizan sondas radiotópicas resultan indispensables en las mediciones continuas de espesores durante la producción de papel, plástico y planchas de acero. Las comprobaciones de procesos y de la calidad se efectúan empleando sistemas de control nucleónico normales en las líneas de producción industrial.

**Seguridad industrial y calidad de los productos:** El examen o ensayo no destructivo mediante radiografía con rayos gamma o rayos X se utiliza ampliamente para verificar soldaduras, piezas fundidas, maquinaria y piezas de cerámica para garantizar su calidad y seguridad. Asimismo, las técnicas de radiotrazadores son instrumentos inigualables para la optimización de los procesos químicos en reactores, la detección de fugas y los estudios de desgaste y corrosión, entre otras aplicaciones.

**Protección del medio ambiente:** En Alemania, los Estados Unidos, el Japón y Polonia se ha venido desarrollando una tecnología innovadora que utiliza haces electrónicos para eliminar simultáneamente el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). La lluvia ácida que provocan las emisiones de  $SO_2$  y  $NO_x$  sigue dañando los bosques, lagos y suelos. La tecnología de haces electrónicos resulta muy competitiva desde el punto de vista de los costos y su derivado puede utilizarse como fertilizante.

En este artículo se hace una reseña del estado actual y de las perspectivas futuras de las aplicaciones industriales de las tecnologías nucleares comerciales. El OIEA, mediante sus diversos programas de cooperación, participa activamente en la transferencia de estas tecnologías a los países en desarrollo interesados en utilizarlas.

## Tratamiento por irradiación

El tratamiento por irradiación es una tecnología de uso muy extendido en las líneas de producción industriales. Comparado con métodos de tratamiento más convencionales ofrece varias ventajas, entre ellas, su rendimiento energético, la facilidad con que puede controlarse y su posibilidad de emplearse en aplicaciones en que intervienen diversos tipos de materiales.



El Dr. Machi es Director General Adjunto, Jefe del Departamento de Investigación e Isótopos del OIEA, y el Sr. Iyer es Director de la División de Ciencias Físicas y Químicas del Departamento.

Las aplicaciones industriales del tratamiento por irradiación están muy generalizadas en muchos países, y va en aumento en otros. En el Japón, por ejemplo, ya en 1994 se estaban utilizando 280 aceleradores de haces electrónicos con fines industriales y en actividades de investigación y desarrollo. Los países en desarrollo aplican cada vez más las tecnologías de las radiaciones, frecuentemente con el apoyo del OIEA, para el desarrollo de los recursos humanos necesarios y la adquisición de equipos. Entre las esferas de especial interés figuran las siguientes:

**Productos poliméricos:** La producción comercial de polietileno reticulado para el aislamiento de alambres y cables se logró por primera vez utilizando el tratamiento por irradiación en los Estados Unidos en el decenio de 1950. Desde entonces, las actividades de investigación y desarrollo han desembocado en provechosas aplicaciones industriales. Entre los productos que se obtienen mediante estos procesos cabe mencionar los siguientes: alambres y cables reticulados (termorresistentes); polietileno celular; tuberías y planchas termoencogibles; revestimientos de superficie para tableros de madera, papel, tejas de techo, planchas de acero, baldosas de yeso y discos flexibles; cintas adhesivas; compuestos de madera y plástico (resistentes al desgaste y al agua); coagulantes de polímeros (de alto peso molecular); neumáticos para automóviles (reticulados); polvo de teflón (por descomposición de teflón usado); lentes de contacto; materiales hidrófilos (para pañales desechables, entre otros productos); fibras desodorantes; poliuretano reticulado (cable para sensor de freno antibloqueo); nilón reticulado; y separadores de baterías.

Estos productos tienen características singulares. En muchos casos el tratamiento por irradiación ofrece claras ventajas frente a procesos convencionales desde el punto de vista de las propiedades de los productos, el ahorro en la producción, la amplia gama de temperaturas de elaboración y la protección del medio ambiente.

Varios países en desarrollo, como China y la República de Corea, llevan varios años utilizando a escala comercial la radioreticulación de alambres y cables de aislamiento.

En estos momentos se realizan actividades de investigación y desarrollo para la obtención de materiales avanzados, como por ejemplo, nuevos sistemas de administración de medicamentos, materiales biocompatibles y fibras de carburo de silicio (SiC) muy resistentes a las temperaturas.

En el Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica (JAERI) se ha creado una nueva fibra de SiC resistente a las temperaturas extraordinariamente elevadas. Dicha fibra fue obtenida a partir de fibras de policarbosilano (PSC) radioreticulado, sometidas posteriormente a tratamiento térmico a 1200°C. Esta fibra ha resultado ser mucho más termorresistente que la fibra SiC obtenida a partir del PCS químicamente reticulado (el método tradicional). (Véase el gráfico.)

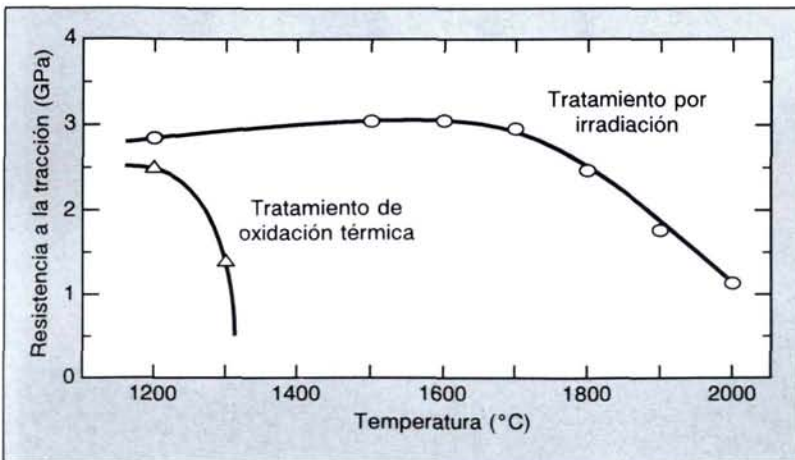
La dosis requerida para efectuar la reticulación es 10 MGy con un acelerador de haces electrónicos. El JAERI explota una planta experimental donde se irradian 4,5 kg de PCS por lote al vacío. Este proyecto se emprendió con el objetivo de crear la tecnología y construir una planta para la producción a escala comercial de una tonelada de fibra de SiC mensual, nivel de producción que se prevé alcanzar antes de 1996.

Las aplicaciones de las radiaciones para el curado de revestimientos de superficie se están ampliando, tanto por la cantidad de productos que se procesan como por el desarrollo de nuevos productos. Esta ampliación se debe a las ventajas que ofrece esta tecnología en esferas como la calidad del producto, el rendimiento energético y la protección del medio ambiente. En los procesos convencionales de curado térmico de revestimientos, los solventes orgánicos se evaporan y forman películas de polímero en el sustrato. Los solventes evaporados (hidrocarburos) se liberan en la atmósfera en forma de gases de efecto de invernadero que producen oxidantes. El consumo mundial de revestimientos convencionales es aproximadamente de 20 millones de toneladas anuales. Por ello cada año se liberan en la atmósfera 8 millones de toneladas de solventes orgánicos (40% del consumo total de revestimientos de superficie). Los revestimientos curables producidos con haces electrónicos y luz ultravioleta no contienen solventes, evitándose así dichas emisiones. No obstante, estos revestimientos curables mediante irradiación aún representan sólo el 1% de todos los revestimientos utilizados. Se espera que el interés por la protección del medio ambiente haga que aumente rápidamente el uso de este nuevo revestimiento.

**Esterilización de productos médicos.** En los países industrializados, entre el 40% y el 50% de los productos médicos se radioesterilizan. Se espera que esta cifra aumente a un 80% en años venideros. En este proceso se utilizan aceleradores de haces electrónicos o cobalto 60. El tratamiento por irradiación ha demostrado ser mejor que el tratamiento convencional con óxido etilénico en cuanto a la seguridad de los trabajadores y los consumidores, la fiabilidad de la desinfección y la simplicidad del tratamiento.

Se prevé que esta aplicación se extienda rápidamente en los países en desarrollo. El OIEA y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) han ejecutado proyectos para el establecimiento de plantas de radioesterilización en la India,

Comparación de la resistencia térmica de la fibra SiC producida mediante tratamiento térmico y por irradiación



la República de Corea, Chile, Hungría, el Irán, Turquía, el Perú, Bulgaria, Portugal, Siria, Ecuador y Ghana.

La radioesterilización está ganando nuevos adeptos en la esfera de los cosméticos y las materias primas para productos farmacéuticos.

**Purificación de gases de combustión.** La lluvia ácida debida a la presencia de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en los gases de combustión procedentes del quemado de combustibles fósiles está dañando gravemente el medio ambiente. Una tecnología innovadora que utiliza haces electrónicos para eliminar por irradiación simultáneamente estos contaminantes fue creada en el Japón y posteriormente desarrollada por grupos de investigación de los Estados Unidos, Alemania, Italia y China. En estos momentos en Varsovia se está explotando una planta experimental en el marco de un proyecto conjunto del OIEA y Polonia. Esta planta puede purificar 20 000  $\text{m}^3$  de gases de combustión procedentes del quemado de carbón de la planta calefactora local.

Recientemente, la planta logró, funcionando sin interrupción durante más de un mes, eliminar 90% de  $\text{SO}_2$  y 85% de  $\text{NO}_x$  de los gases de combustión. Como proyecto modelo del OIEA se prevé construir una planta de haces electrónicos a escala normal para el tratamiento de las emisiones procedentes de las estaciones energéticas de Polonia alimentadas con carbón.

En el Japón están funcionando sin contratiempos tres plantas experimentales de haces electrónicos para el tratamiento de los gases de combustión procedentes de estaciones energéticas alimentadas con carbón, incineradores municipales de desechos y túneles de tránsito, respectivamente.

**Desinfección del lodo cloacal y su reciclado.** La desinfección de lodo cloacal por irradiación se ha estudiado en plantas experimentales y a escala normal. En Alemania y la India están funcionando satisfactoriamente plantas a escala normal. El lodo irradiado se utiliza en las tierras agrícolas como fertilizante orgánico. En el Japón, se ha desarrollado una tecnología de irradiación del lodo para producir un composte desinfectado para la agricultura. El OIEA se ha propuesto iniciar un nuevo programa para ampliar la transferencia de esta tecnología a los usuarios finales.

**Purificación del agua.** También se está estudiando la eliminación de contaminantes orgánicos mediante la irradiación de aguas residuales y de agua potable natural. En Austria está funcionando una planta experimental para el tratamiento de agua potable con haces electrónicos y ozono. En Miami, Florida, se ha realizado un estudio técnico para evaluar la eficiencia y la eficacia en relación con el costo del tratamiento con haces electrónicos para la eliminación de contaminantes tóxicos en corrientes de agua, como aguas subterráneas, efluentes secundarios y agua potable.

**Radiotrazadores.** El trazador es una sustancia que se añade intencionalmente a un sistema con miras a estudiar su comportamiento dinámico. Los radiotrazadores son muy fáciles de detectar y de medir, y su uso se halla muy difundido. Permiten observar las reacciones químicas y los procesos físicos, incluso en sistemas cerrados, a temperaturas elevadas y altas presiones, y en tiempo real mediante

técnicas de medición no invasivas. Entre sus aplicaciones se incluyen la detección de fugas y la localización de obstrucciones en tuberías soterradas y otros sistemas industriales (por ejemplo, en la industria petrolera y petroquímica); estudios de mezcla y combinación en las industrias metalúrgica y química (por ejemplo, en la producción de aleaciones); la medición de la tasa de desgaste y la vigilancia del desgaste en máquinas rotatorias (por ejemplo, máquinas herramienta y pistones de motores de combustión interna); estudios de la distribución del tiempo de permanencia en vasijas de tratamiento (por ejemplo, en plantas petroquímicas); la optimización de los parámetros de procesos; y la investigación de la dispersión de contaminantes en el medio ambiente.

Estas aplicaciones se han consolidado ya y están muy extendidas en las industrias de todo el mundo. Sus beneficios reales son indirectos en el sentido de que, en su ausencia, los costos de producción y la no optimización de los parámetros de procesos habrían convertido la esfera de la producción en una esfera ineficiente, antieconómica y, por tanto, no competitiva.

**Sistemas de control nucleónico.** La aplicación del análisis durante el proceso en las industrias de la minería, de tratamiento de los minerales, metalúrgica y energética, ha abierto nuevas posibilidades para ejercer un mejor control sobre los procesos y, por tanto, reducir los costos y las pérdidas. Los sistemas de análisis durante el proceso basados en la radiación nuclear —agrupados bajo el título genérico de sistemas de control nucleónico (NCS)— han llegado a ser instrumentos esenciales de este avance tecnológico. Dada la doble ventaja que ofrecen al permitir una medición no destructiva y un buen estado de funcionamiento incluso en condiciones adversas con altas temperaturas y presiones (a diferencia de los métodos tradicionales), los NCS proporcionan información continua sobre los parámetros de control de calidad de la producción de una instalación industrial.

El uso de las sondas nucleónicas en esferas que van desde la diagráfia nuclear de sondeos utilizada para evaluar la calidad y complejidad de los minerales en las galerías de minas hasta la evaluación de la composición de los minerales y su posterior tratamiento, las ha hecho instrumentos indispensables en la industria minero-metalúrgica. El análisis rápido durante el proceso de las distintas composiciones en tiempo real permite mejorar el control de las operaciones de extracción, tratamiento y mezcla, y aumentar la recuperación de minerales valiosos. En los últimos años una serie de técnicas —como la radiación gamma inmediata inducida por neutrones, la termalización neutrónica, la absorción gamma y la fluorescencia X inducida por isótopos (XRF)— han revolucionado la explotación y el rendimiento de las instalaciones.

La industria del carbón fue uno de los primeros grandes beneficiarios de los NCS. La evaluación continua del contenido de ceniza (mineral) del carbón es un parámetro muy importante para el proveedor y el consumidor. Habida cuenta de que el carbón se utiliza predominantemente en la generación de electricidad, esa información resulta importante para el rendimiento de las calderas, su vida útil, y para evitar la contaminación atmosférica. Durante

todo el proceso se precisa disponer de información detallada sobre los contenidos totales de ceniza, sus componentes esenciales y el contenido de humedad, y los NCS modernos garantizan el grado de precisión de la información y la fiabilidad necesarios. Utilizando generalmente una fuente neutrónica de californio 252 y detectores gamma, los rayos gamma procedentes del carbón se analizan espectroscópicamente en tiempo real para determinar sus elementos. Los elementos críticos para controlar el rendimiento de las calderas son aluminio, silicio, calcio, hierro, azufre, cloro, nitrógeno, potasio y titanio.

Dado que el sector industrial fundamental en todos los países es la industria de producción de metales de base y la de tratamiento de minerales, el impacto del uso más difundido de esta aplicación tecnológica avanzada se ha hecho bien manifiesto. Por ejemplo, en Australia solamente había en 1961, unas 125 sondas nucleónicas, mientras que en 1990 su número ascendía a más de 12 000. Entre ellas figuran las sondas de densidad, las sondas de espesor, la maquinaria para pesar el material en correas transportadoras, las sondas de humedad, las sondas de pozos perforados, los monitores de cenizas de carbón, los analizadores de masas y los analizadores durante el proceso, y las unidades de radiografía industrial. Este asombroso aumento del número de sondas de este tipo registrado en la industria australiana es una clara prueba de los beneficios técnicos y económicos que se derivan de su empleo. En Australia se estima que el aumento alcanzado en la producción gracias al uso de estas sondas nucleónicas asciende a más de 50 millones de dólares anuales.

Aunque la tecnología básica de los NCS es bien conocida, en las publicaciones técnicas que se editan cada año se informa de nuevas e innovadoras aplicaciones, como por ejemplo, la estimación de las cenizas de carbón utilizando la radiactividad natural de la ceniza; la concentración de ácidos en plantas químicas; la ultrapurificación de metales para la industria de semiconductores; y el análisis volumétrico y durante el proceso de piedra caliza cruda para la industria del cemento. Actualmente en la industria minero-metalúrgica se emplean miles de analizadores XRF portátiles para identificar los metales y la chatarra que se reciben; verificar in situ las aleaciones; controlar la calidad; analizar los procesos de fundición y soldadura; identificar los desechos peligrosos; y analizar in situ los suelos y aguas subterráneas contaminados.

**Diagrafía nuclear de sondeo y análisis de activación.** El uso de la diagrafía nuclear de sondeo en la industria del petróleo es bien conocido. Su importancia radica en que permite medir posibles horizontes petrolíferos; evaluar las reservas de petróleo y gas y su explotación; y analizar los campos de petróleo establecidos a fin de optimizar la metodología de extracción de este mineral. Por ejemplo, la dispersión de los rayos gamma procedente de las paredes de los pozos perforados facilita información sobre la densidad y el número atómico medio de las formaciones rocosas del subsuelo. Las mediciones de la dispersión neutrónica revelan el tamaño medio de los poros de las formaciones rocosas que rodean el pozo: cuanto mayores sean los poros, mayor será la capacidad de las rocas para contener hidrocarburos. El

estudio de las interacciones de los rayos gamma y los neutrones con las formaciones rocosas petrolíferas y minerales sigue siendo una importante esfera de investigación. Conjuntamente con otra información geofísica y geoquímica obtenida por diagrafía y estudios mediante la elaboración de modelos, la investigación permite conocer la relación cuantitativa entre las propiedades de las rocas petrolíferas y las señales detectadas. Estos datos a la larga proporcionan una información completa sobre el medio subterráneo, incluso a profundidades de varios kilómetros.

Otro método técnicamente bien conocido, la espectroscopia de rayos gamma en suspensión, se ha utilizado ampliamente para descubrir mineralizaciones de uranio. También se ha utilizado para identificar otros minerales importantes, ya que la mineralización del uranio está asociada a elementos localizadores de trayectoria como oro, plata, berilio, bismuto, cobalto, níquel, cobre, mercurio, molibdeno, niobio, plomo, estaño, zinc, circonio y titanio, entre otros. La técnica de análisis instrumental por activación neutrónica (AAN) ha sido un importante medio para la localización geoquímica y geológica de horizontes de minerales. El método es intrínsecamente insensible a la contaminación y los efectos matriciales, y no requiere largas etapas de preparación de muestras. Con él se pueden obtener principalmente datos sobre la concentración de más de 40 elementos de la tabla periódica. A pesar de que el acceso limitado a los reactores nucleares para la irradiación de muestras ha impedido que se generalice el uso del AAN en muchos países, este método sigue siendo el preferido para la prospección de oro y platino.

### Instrumentos innovadores

En muchos sentidos las tecnologías nucleares y de las radiaciones se han convertido en valiosos instrumentos innovadores. En muchos países la transferencia de estas tecnologías mediante los programas de investigación conjunta y de asistencia técnica del OIEA ha tenido, y sigue teniendo, vital importancia para su desarrollo económico.

La experiencia ha demostrado que la aplicación óptima y adecuada de las tecnologías nucleares y de las radiaciones reporta beneficios prácticos considerables. Su uso puede ayudar a situar a las industrias que las apliquen entre las más productivas de hoy y de mañana.