

# Los aceleradores en la ciencia y la industria: Énfasis en el Oriente Medio y Europa

*Numerosos países están aplicando tecnologías avanzadas que emplean aceleradores hipoenérgicos, pero no todos logran aprovechar sus ventajas*

por  
Vlado Valkovic  
y Wiktor  
Zyszkowski

Concebidas al inicio como instrumentos de la física avanzada, las máquinas comúnmente conocidas como aceleradores de partículas hoy día se emplean a diario en la ciencia, la industria, la medicina, la protección del medio ambiente y en otras esferas. Aunque se presentan en una diversidad de tamaños y tipos, los aceleradores que producen haces relativamente hipoenérgicos se han convertido en unos de los más importantes instrumentos analíticos nucleares. Entre las aplicaciones prácticas de estos aceleradores hipoenérgicos figuran los análisis científicos de alta sensibilidad de oligoelementos en, por ejemplo, los estudios de la contaminación atmosférica o en la atención sanitaria y el tratamiento médico.

A pesar de la gama de aplicaciones prácticas que ofrece, esta tecnología de alto nivel aún no ha registrado avances significativos en la mayoría de los países en desarrollo, en notable contraste con el mundo industrializado. En aras de acortar esta brecha tecnológica y teniendo en cuenta los beneficios económicos y sanitarios que se derivan de las aplicaciones de los aceleradores hipoenérgicos, el OIEA emprendió en 1993 un proyecto regional por conducto de sus programas de asistencia y cooperación técnica. El proyecto sobre el empleo de aceleradores hipoenérgicos en la ciencia y la industria está destinado básicamente a coordinar las actividades entre los países interesados del Oriente Medio y Europa, y complementa varios proyectos nacionales individuales iniciados en esta esfera.

En este artículo se ofrece una breve reseña de las aplicaciones comunes de estos aceleradores y se describe la labor que se está realizando en el marco de los proyectos nacionales y regionales del OIEA en que participan países del Oriente Medio y Europa.

---

El Sr. Valkovic es Jefe del Laboratorio de Física, Química e Instrumentación de los Laboratorios del OIEA en Seibersdorf, Austria, y el Sr. Zyszkowski es funcionario del Departamento de Cooperación Técnica del OIEA. Pueden solicitarse referencias técnicas completas a los autores.

Más de 20 países aspiran a formar parte del proyecto regional.

Este proyecto aborda algunos problemas fundamentales referentes a la interrelación entre la transferencia efectiva de tecnologías y el desarrollo científico e industrial. Por lo general, en los países industrializados la vinculación entre los institutos científicos y las ramas de la industria es estrecha, y las políticas de desarrollo están bien consolidadas. En el mundo en desarrollo, por el contrario, esto no sucede las más de las veces, deficiencia ésta que puede impedir a esos países recibir los beneficios prácticos de las tecnologías avanzadas. El proyecto regional trata de ayudar a los países a establecer los vínculos necesarios y aplicar políticas eficaces. En este sentido, es importante tener presente que las nuevas tecnologías de hoy serán las tecnologías convencionales de mañana, y que los países deben aumentar sus capacidades científicas e industriales cuidadosa y selectivamente en esferas que les ofrezcan ventajas competitivas.

---

## Aplicaciones de los aceleradores

Los aceleradores y sus productos se emplean en casi todas las ramas de la alta tecnología y la medicina moderna. A continuación se describen sucintamente algunas aplicaciones típicas de los aceleradores hipoenérgicos, la mayoría de ellos ciclotrones, generadores electrostáticos (de Van de Graaff o similares) y aceleradores lineales ("LINAC").

**Aceleradores como instrumentos analíticos.** Numerosas han sido las esferas en que varias técnicas analíticas eficaces basadas en la tecnología de aceleradores han arrojado resultados impresionantes. (Véase el gráfico.) Entre ellas están la emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE), la retrodispersión de Rutherford (RBS), el análisis de la reacción nuclear (NRA), la difusión elástica de partículas (PESA), la emisión de rayos gamma inducida por partículas (PIGE), la microscopía por canalización (CM), la microscopía por transmisión de barri-

do iónico (STIM), y la microscopía electrónica secundaria (SEM).

Combinando adecuadamente los productos de la reacción detectados, se puede obtener información sobre la composición total de elementos en relación con la morfología de la muestra. La exploración mediante haces de iones del tamaño del punto explorador ha transformado estas técnicas de instrumentos analíticos en dispositivos de obtención de imágenes, que indican la distribución de los elementos y constituyen un verdadero "microscopio" nuclear.

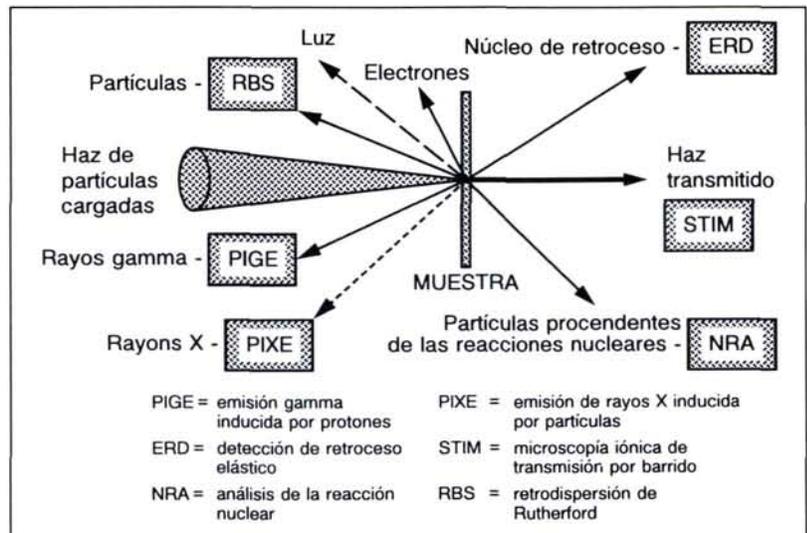
Otra técnica —la espectrometría de masas con aceleradores (AMS)— utiliza un acelerador y su sistema de transporte de haces como instrumento ultrasensible que puede detectar las abundancias isotópicas de radisótopos de período largo (berilio 10, carbono 14, aluminio 26, cloro 36, calcio 41 y yodo 129) con una variación de  $10^{-15}$  a  $10^{-16}$  en muestras pequeñas (mg). Más de 30 laboratorios de todo el mundo han aceptado la AMS.

Esta técnica tiene muchas aplicaciones, como en las esferas de la arqueología, el arte, la paleoantropología, la geología, la paleoclimatología, la mineralogía extraterrestre y la biología. La AMS se emplea, por ejemplo, en la mayoría de las mediciones de dataciones por radiocarbono, con una sensibilidad muy superior a la de los métodos más tradicionales de recuento de desintegraciones beta del carbono 14.

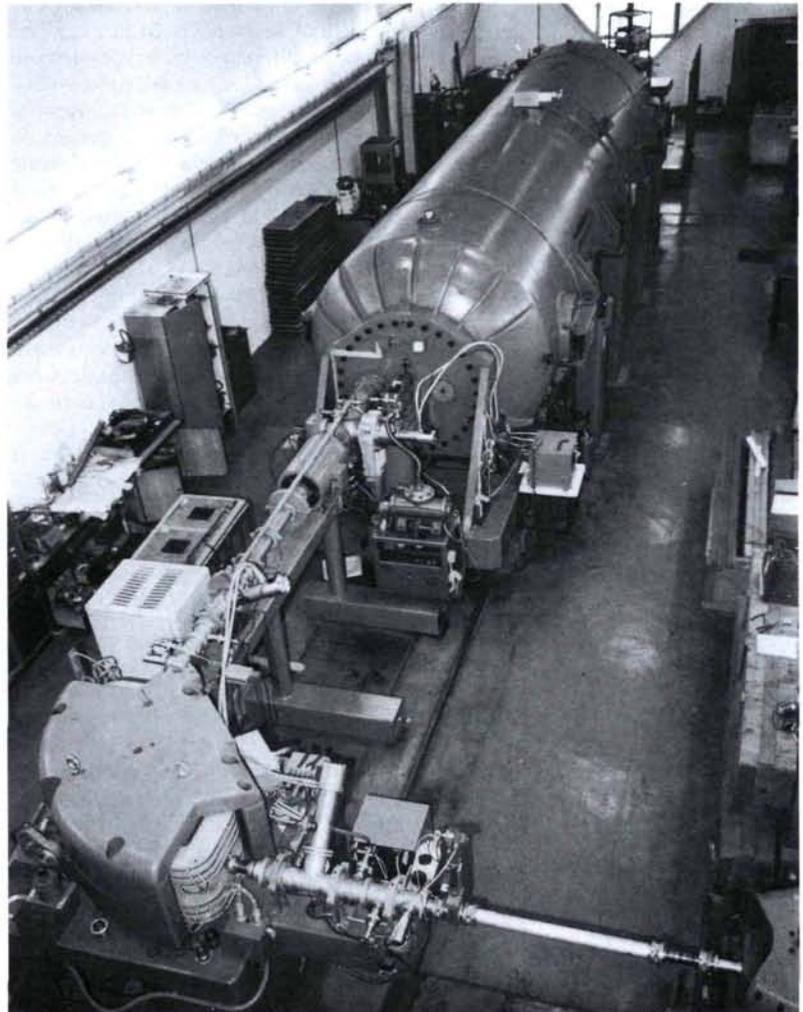
**Los aceleradores en las ciencias biológicas y la medicina.** Los haces de partículas que producen los aceleradores pueden emplearse en instituciones médicas con fines de diagnóstico y terapéuticos. Entre sus aplicaciones con fines de diagnóstico se incluyen el uso de técnicas analíticas nucleares para el análisis de elementos, de diferentes radisótopos y, en particular, de emisores de positrones. Las aplicaciones terapéuticas no se limitan a la radioterapia. Abarcan también otra amplia serie de actividades que van desde el empleo de materiales especiales hasta las aplicaciones quirúrgicas.

El análisis de los niveles de concentración de oligoelementos en los fluidos y tejidos corporales es muy promisorio como ensayo clínico. Las técnicas basadas en el uso de aceleradores ofrecen posibilidades muy interesantes para atender estos problemas, ya que pueden detectar varios oligoelementos simultáneamente en muestras muy pequeñas (biopsia, cabello, sangre y otros). Quizás en ésta como en ninguna otra esfera, el desarrollo de aceleradores ha tenido repercusiones importantes en la medicina, en especial en el campo de la medicina nuclear y la radioterapia. Un ciclotrón produce una gama de radisótopos para aplicaciones médicas que no pueden obtenerse en un reactor nuclear. Estos radisótopos permiten conocer mejor los procesos de desarrollo de las enfermedades de los seres humanos. Algunos radisótopos tienen períodos de semidesintegración cortos, que se miden en minutos y que, por tanto, deben producirse cerca de donde van a utilizarse. Los radionucleidos que se utilizan con más frecuencia en la tomografía por emisión de positrones (PET) son el carbono 11, el nitrógeno 13, el oxígeno 15 y el flúor 18.

Además de las fuentes de radiación tradicionales como los rayos gamma o los rayos X producidos por los aceleradores lineales de electrones, varios centros han estado aplicando terapias con radiación



Cuando se bombardea una muestra con haces de partículas cargadas ocurren varios procesos. Todos ellos pueden aprovecharse para obtener información analítica sobre la muestra que se esté analizando, y muchos de ellos ya son técnicas analíticas nucleares reconocidas. Foto: Acelerador de Van de Graaff en tandem EN, donado por la Universidad de Rice de Houston, Texas, al Instituto Ruder Boskovic de Zagreb, Croacia.



neutrónica y protónica. Una docena de instalaciones que en la actualidad se dedican a investigar la terapia con radiación protónica han notificado los excelentes resultados alcanzados en la lucha contra determinadas enfermedades. Asimismo varias localidades dispondrán muy pronto de instalaciones para el tratamiento con iones pesados. Los haces de iones pesados tienen una distribución profundidad/dosis favorable y ofrecen la posibilidad de aplicarlos en la neurocirugía.

**Los aceleradores en la ciencia de los materiales.**

El uso de aceleradores en la modificación de los materiales y su análisis ulterior es una esfera de las tecnologías basadas en aceleradores que crece rápidamente. Numerosas aplicaciones de la tecnología de implantación de iones han pasado de los laboratorios de investigación a la industria. Un ejemplo sobresaliente es el desarrollo de la implantación de iones para aumentar la resistencia al desgaste de las prótesis.

Es una opinión aceptada que el establecimiento de tecnologías avanzadas de tratamiento y maquinado de materiales, capaces de crear nuevos materiales hasta niveles atómicos y moleculares, provocará el advenimiento de una nueva revolución industrial. Ello podría lograrse con tecnologías basadas en aceleradores que produzcan haces de iones de alta energía concentrados, agrupados y de amplio alcance.

Cada vez es mayor el número de aceleradores de partículas cargadas que se emplean en la modificación y el análisis de diferentes materiales usando haces de iones del orden de los megaelectrón-voltios (MeV). Entre los trabajos realizados se incluyen: la implantación y el tratamiento iónicos, la síntesis de películas delgadas magnéticas y la modificación de superficies, la fabricación de biomateriales, el estudio de los fenómenos de la corrosión-erosión, las mediciones del perfil de concentración, y estudios de los fenómenos de la difusión.

En la actualidad los sistemas de implantación iónica de alta energía pueden obtenerse en no menos de cinco compañías de todo el mundo. Todos están destinados a la aceleración de iones pesados de carga sencilla o doble como el boro, el nitrógeno, el fósforo, el arsénico y el antimonio. Controlando la energía del haz, se pueden utilizar los sistemas en el tratamiento de materiales a la profundidad superficial deseada. De esta forma, por ejemplo, en materiales corrientes pueden formarse múltiples capas o capas superficiales modificadas de excelente calidad para numerosos fines.

**Los aceleradores en la protección del medio ambiente.** Las técnicas analíticas basadas en aceleradores se emplean en la vigilancia de la contaminación ambiental y en la detección de las fuentes de contaminación. Debido a las posibilidades que ofrecen para analizar múltiples elementos y medir perfiles de concentración, se han empleado ampliamente en estudios sobre la contaminación atmosférica. (Véanse los gráficos.)

Una de las principales fuentes de contaminación atmosférica es el quemado del carbón utilizado para la generación de electricidad y en la calefacción, a pesar de las mejoras introducidas en las operaciones de combustión y el uso de dispositivos de depuración de gases tales como los precipitadores electrostáticos (y los aceleradores de electrones). Además, los

precipitadores eléctricos pueden tener una eficiencia colectora mínima de partículas de 0,1 a 1,0 micrómetros. Estas partículas tienen un tiempo de permanencia en la atmósfera más largo y efectos sobre la salud y la calidad del aire mayores que una masa semejante de partículas de mayor tamaño. Estas partículas contienen concentraciones superficiales inusualmente grandes de oligoelementos potencialmente tóxicos que aumentan con la reducción del tamaño de las partículas, debido a los mecanismos de formación de cenizas volantes.

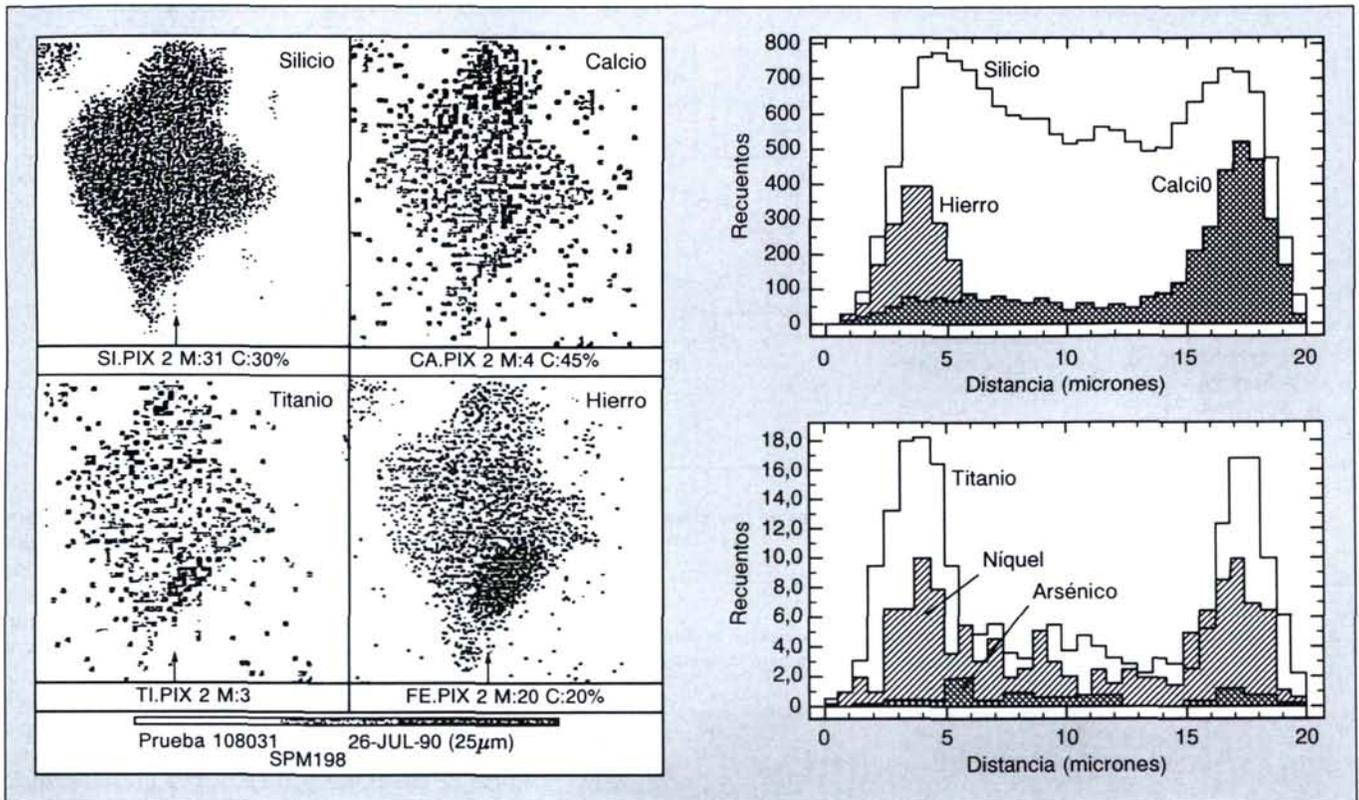
**Los aceleradores en la industria.** Otra aplicación digna de mencionar es la litografía por proyección iónica. La industria de la microelectrónica requiere el desarrollo de capacidades litográficas por debajo de los 0,3 micrómetros para dispositivos de silicio avanzados y capacidades por debajo de 0,1 micrómetros para dispositivos heteroestructurales y de acoplamiento cuántico. La litografía por proyección iónica puede satisfacer estos estrictos requisitos, sobrepasando los límites de los métodos litográficos ópticos y de rayos X.

Los países industrialmente desarrollados conocen las posibilidades que ofrecen las tecnologías basadas en aceleradores. Por ejemplo, Alemania tiene 23 aceleradores electrostáticos, nueve de los cuales son tandems con sistemas experimentales para determinar los perfiles de hidrógeno, la RBS, la aplicación de iones, la canalización, la microsonda y la AMS. Muchas de estas instalaciones dedican más de la mitad de su tiempo de explotación a la investigación aplicada. Además hay 16 ciclotrones, algunos diseñados exclusivamente para la producción de isótopos, no menos de tres con capacidades PET, y 11 sincrotrones y aceleradores lineales utilizados fundamentalmente en la aceleración de iones pesados. En el Japón, sólo las aplicaciones médicas de los aceleradores utilizan 13 ciclotrones con capacidades PET, aceleradores de iones pesados, y más de 500 aceleradores lineales para aplicaciones terapéuticas.

### Proyectos nacionales apoyados por el OIEA

Durante los últimos 15 años, el programa de asistencia técnica del OIEA para el Oriente Medio y Europa ha incluido una serie de proyectos que emplean tecnologías de aceleradores. Varios laboratorios en Albania, Bulgaria, Croacia, Grecia, Hungría, Irán, Jordania, Polonia, Portugal y Rumania, entre otros países, han recibido asistencia en virtud de los proyectos nacionales destinados a mejorar o establecer laboratorios de aceleradores. El OIEA, empleando gran cantidad de fondos en moneda no convertible, suministró a finales del decenio de 1970 y principios del de 1980, aceleradores de origen soviético a Bulgaria, Hungría, Polonia y Portugal, por sólo citar algunos.

En Hungría, un laboratorio nacional ubicado en Debrecen recibió un ciclotrón que comenzó a funcionar en 1985 y que en la actualidad se utiliza ampliamente en investigaciones fundamentales de física atómica y nuclear, y para aplicaciones en la industria, la agricultura y la medicina, incluida la producción de isótopos. El laboratorio se ha convertido en uno de los principales de la región y se ocupa



En los estudios sobre contaminación atmosférica pueden emplearse tecnologías de aceleradores (a saber, la PIXE y la RBS) para caracterizar las partículas de cenizas volantes midiendo las concentraciones de elementos y obteniendo perfiles de concentración de elementos. En el gráfico se muestran los resultados de un barrido areal y por líneas de partículas de cenizas volantes de aluminosilicato.

de facilitar conocimientos y organizar reuniones, seminarios y sesiones de capacitación individual y colectiva.

En Bulgaria, desde 1984 el OIEA ha venido brindando apoyo para la creación de un laboratorio de aceleradores en el Instituto Superior de Tecnología Química de Burgas. El objetivo es apoyar las aplicaciones de esta tecnología en las industrias petroquímica y de producción de cables. En 1991 se instaló un acelerador de electrones. Se tiene previsto que como resultado del proyecto Bulgaria producirá más materiales de aislamiento de alambres termo-resistentes y nuevos materiales de envase, reduciendo así la necesidad de importar esos productos.

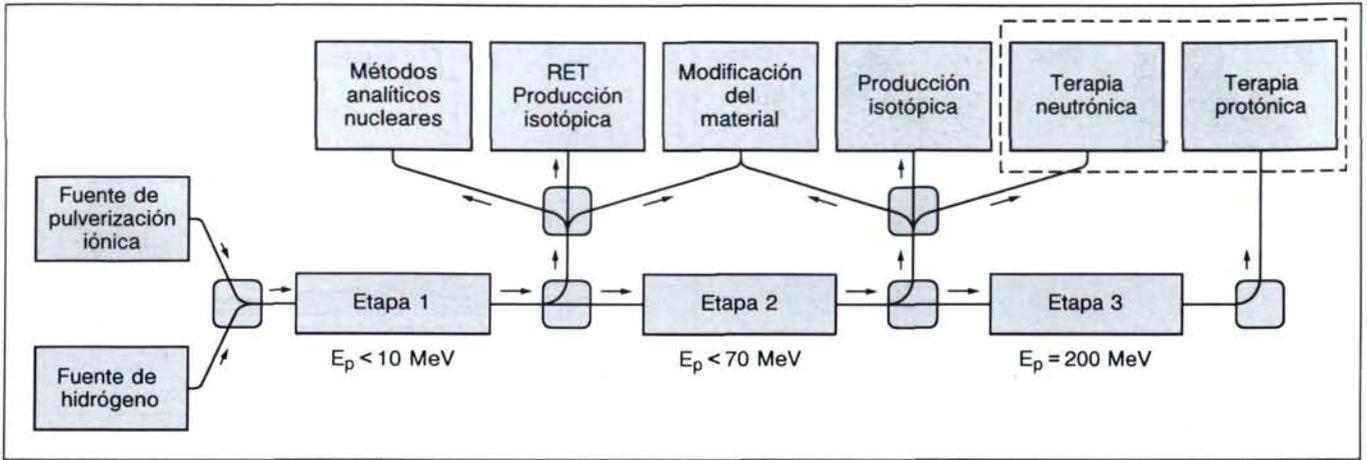
En Polonia, el Instituto de Química y Tecnología Nucleares de Varsovia ha recibido el apoyo del OIEA durante los últimos 10 años. Al inicio se le suministró un acelerador de electrones piloto y algunos equipos auxiliares procedentes de la antigua Unión Soviética. En la actualidad, el acelerador se utiliza para la producción experimental de tubos y cintas termoencogibles, entre otras aplicaciones.

En 1987 se emprendió en Polonia un proyecto muy importante con el mismo Instituto de Varsovia, sobre el uso de la tecnología de haces electrónicos para la depuración de los gases de combustión de las centrales eléctricas polacas alimentadas con carbón. Con la incorporación de dos aceleradores soviéticos, se construyó en Varsovia una instalación de demostración, concepto que se está difundiendo ahora en la región de Szczecin, y que se espera que

tenga resultados positivos para el medio ambiente al eliminar de manera simultánea y efectiva contaminantes como el  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_x$ . El proyecto ha recibido generosas contribuciones de los Estados Unidos y el Japón, y en muchos sentidos se ha convertido en un proyecto modelo. Varios otros países dentro y fuera de la región han expresado su interés en la tecnología, y se necesitará contar con un apoyo sostenido.

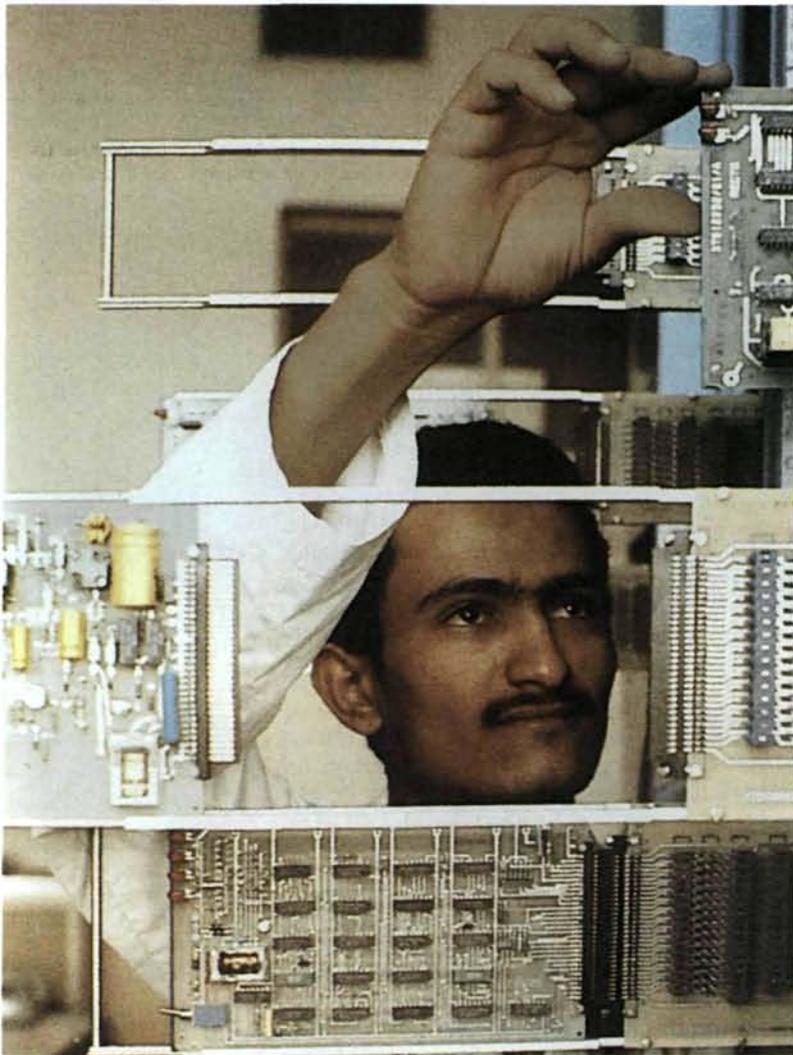
En Albania, Croacia, Grecia, Irán, Portugal y Rumania, la asistencia prestada por el OIEA ha ayudado a aumentar las capacidades experimentales de laboratorios dotados de aceleradores de Van de Graaff. En el Instituto Ruder Boskovic de Zagreb, los esfuerzos que se realizan en el marco del proyecto están dirigidos a perfeccionar un acelerador ya instalado para trabajos microanalíticos. Entre las aplicaciones actuales del acelerador cabe mencionar el desarrollo de técnicas analíticas nucleares; el estudio de los oligoelementos presentes en el carbón, las muestras biomédicas, y otros materiales; y la investigación de las reacciones nucleares y en materia de dosimetría.

En Grecia, se está instalando un goniómetro en el laboratorio de aceleradores del centro Demokritos de Atenas en virtud de un proyecto financiado por los Estados Unidos, lo que abrirá nuevas posibilidades a las aplicaciones en la ciencia de los materiales y otras esferas. Asimismo, en Portugal se ha dotado al acelerador de Van de Graaff existente de medios para llevar a cabo investigaciones en las esferas de la físi-



Arriba: Esquema de una instalación de aceleradores de tres etapas típico de un hospital.

Abajo: Entre las aplicaciones industriales de los aceleradores están la investigación y el desarrollo de materiales para la microelectrónica.



ca atómica y de los estados sólidos. Entre esos medios se cuenta una computadora, un analizador multicanales, un detector semiconductor y un equipo de vacío. Utilizando las técnicas PIXE y RBS, entre otros métodos analíticos, se ha emprendido el estudio de muestras biológicas, aerosoles y dispositivos de silicio.

En varios países de la región crece el interés en las aplicaciones del ciclotrón para la radioterapia moderna. En el Irán se está construyendo un laboratorio de ciclotrones y el OIEA está proporcionando orientación, conocimientos técnicos, capacitación y algunos equipos. La instalación está diseñada para aplicaciones médicas (entre ellas la producción de radisótopos como el talio 201, el galio 67 y el yodo 123; y el uso futuro de la PET) e investigaciones en la esfera de la física nuclear. Turquía prevé poner en marcha un proyecto similar y el OIEA está ayudando a las autoridades de ese país con un estudio de viabilidad.

También se ha prestado apoyo en el empleo de los aceleradores lineales. Por ejemplo, en Portugal se dotó al Laboratorio de Engenharia e Tecnologia Industrial de un acelerador de haces de electrones de origen soviético para apoyar las actividades de investigación y desarrollo de procesos radioinducidos que ofrecen buenas perspectivas, entre ellos, el curado de revestimientos de superficies y la inducción de la reticulación o polimerización de plásticos como los empleados en el forrado de cables.

En el Instituto Ruder Boskovic de Zagreb, el OIEA está apoyando la instalación de un acelerador lineal donado por Alemania, mientras que en Polonia el Organismo ha suministrado equipos al Instituto de Radiación y Química Aplicada de la Universidad Técnica de Lodz donde hay instalado un acelerador lineal. La labor del Instituto abarca la investigación aplicada en la química de los polímeros, la síntesis de compuestos marcados, el estudio de materiales biológicos y bioactivos y la esterilización industrial de productos médicos.

Además, casi todos los países de la región se han interesado en la tecnología de haces de electrones para la irradiación de alimentos en el marco de otro proyecto regional del OIEA. Con todo, sólo Polonia ha decidido construir una instalación, y el OIEA ha apoyado la construcción de un acelerador en ese país.

## Necesidades e iniciativas regionales

A pesar del alcance de los proyectos nacionales de asistencia técnica, no todos los países han podido aplicar en la práctica las tecnologías basadas en aceleradores. Los proyectos con mejores resultados han sido aquellos que ya contaban con la infraestructura y el apoyo local necesarios. En este caso cabe citar los proyectos de Hungría y Polonia. En el otro extremo se encuentran varios países como Turquía, Siria y Chipre, por ejemplo, cuya experiencia en materia de tecnologías de aceleradores era escasa o nula. La situación ilustra las dificultades que entraña el establecimiento efectivo de proyectos plurianuales y la importancia de contar con una fase preparatoria sólida incluidas las decisiones relativas a la asignación de fondos, como condiciones previas para la ejecución eficaz de proyectos de amplia base.

Una necesidad práctica para la planificación de los proyectos basados en aceleradores y la promoción de una cooperación eficaz entre los participantes es la creación de una base de datos. A diferencia de la energía nucleoelectrónica o los reactores de investigación, por ejemplo, falta información completa sobre los aceleradores y sus aplicaciones, a nivel regional y mundial. El OIEA ha comenzado a compilar una base de datos sobre aceleradores hiponeucléuticos (intervalo de energía de 100 keV a 100 MeV). Aunque se ha previsto como una encuesta a escala mundial, en la primera etapa se está realizando un estudio piloto para el Oriente Medio y Europa, y se ha enviado un cuestionario a los Estados de la región Miembros del OIEA.

En enero de 1993, el OIEA emprendió además un proyecto regional para el Oriente Medio y Europa sobre aceleradores hiponeucléuticos y sus aplicaciones en la ciencia y la industria que tiene dos objetivos primordiales:

- Promover el uso de aceleradores iónicos hiponeucléuticos para aplicaciones industriales mediante la cooperación regional y la transferencia de metodologías y técnicas novedosas de países adelantados a los países en desarrollo;
- Promover el uso de técnicas analíticas basadas en aceleradores en los estudios ambientales y biomédicos mediante la cooperación regional y familiarizar a más especialistas con las técnicas utilizadas en los países adelantados de la región.

El plan de trabajo del proyecto incluye tres aspectos básicos: el primero, la compilación y tratamiento de los datos sobre aceleradores existentes en la región. Entre otros datos, se recopilaría información sobre la ubicación, el tipo y los parámetros de la instalación. Esta labor permitiría además determinar los conocimientos técnicos existentes en la región, las esferas de interés común y las necesidades de capacitación.

El segundo aspecto es el perfeccionamiento de las capacidades científicas mediante la celebración de una serie de talleres sobre temas concretos, entre los cuales figurarían, por ejemplo, la preparación de muestras para técnicas analíticas basadas en aceleradores; el uso de técnicas basadas en aceleradores en la prospección y la exploración de minerales; el soporte lógico necesario para la evaluación de los espectros de rayos X, de los rayos gamma y de las partículas cargadas; y prácticas de intercalibración

entre los laboratorios participantes. Se prevé también la celebración de talleres sobre otros temas.

El tercer aspecto está referido a la promoción en las ramas de la industria de las técnicas basadas en aceleradores en aplicaciones concretas. Está prevista la celebración de talleres para científicos, especialistas en aceleradores, gerentes industriales y funcionarios directivos. Con este objetivo se aprovecharán la experiencia y los conocimientos prácticos de los laboratorios avanzados de la región —como el Laboratorio Nazionale di Legnaro en Padua, Italia— con el fin de promover la transferencia de tecnologías. Para que sirva de guía en los minuciosos estudios de viabilidad que los países podrían desear emprender, el OIEA está considerando además preparar un manual sobre el tema.

En resumen, el nuevo proyecto regional del OIEA deberá hacer que las tecnologías basadas en aceleradores se conozcan mejor y que se establezca una colaboración más estrecha entre los países interesados en su aplicación. En este campo varios proyectos nacionales que han contado con el apoyo del OIEA ya han tenido repercusiones positivas en la región, incluidos aquellos orientados a establecer nuevos centros dotados de un acelerador (ciclotrón) para aplicaciones médicas y científicas. Se espera que estas iniciativas contribuirán a fortalecer los vínculos entre los institutos científicos y las ramas de la industria, y ayudarán a los países en desarrollo a formular las políticas necesarias que tengan en cuenta las relaciones que existen entre las ciencias básicas, la investigación y el desarrollo, y la transferencia de tecnologías. De esta forma, podrían ofrecerse mayores posibilidades a los países del Oriente Medio y Europa en la aplicación eficaz de tecnologías avanzadas en aras de su desarrollo social y económico.