

La medicina nuclear y la revolución electrónica

por R. A. Dudley*

En medicina nuclear, los diagnósticos e investigaciones se hacen con ayuda de radionucleidos. Estos estudios fueron una de las primeras aplicaciones de los radionucleidos y probablemente son las más corrientes. Desde sus comienzos, hace unos 50 años, estas actividades han progresado rápidamente como resultado de una evolución en tres frentes: ideas ingeniosas (por ejemplo, los radioinmunoanálisis y la reconstrucción por computadora de imágenes obtenidas por radiación, métodos por los cuales fueron laureados con el Premio Nobel en 1970 físicos médicos); posibilidad de contar con radionucleidos más útiles (por ejemplo, el ^{99m}Tc y ^{125}I abrieron el camino en los años 60), y los adelantos en la electrónica (que progresa a pasos agigantados). La electrónica ha transformado casi todas las tecnologías, pero la finalidad del presente artículo es indicar sus repercusiones en la medicina nuclear y, especialmente, en el programa del Organismo en este campo.

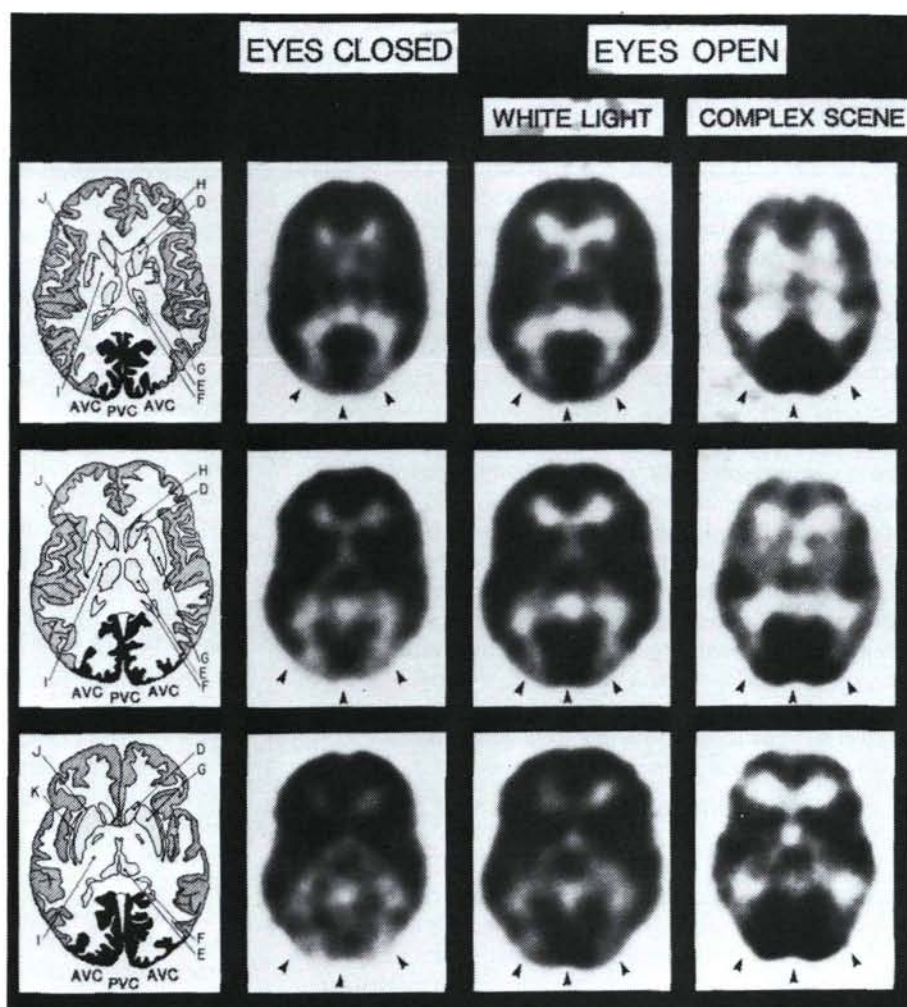
Las consecuencias de la revolución de la electrónica sobre la medicina nuclear se puede notar en el cambio experimentado en los últimos 25 años en los instrumentos para la obtención de imágenes. Se administra al paciente un radionucleido adecuado emisor gamma; a partir de este momento, el dispositivo de obtención de imágenes se encarga de determinar de qué punto del organismo emergen los rayos gamma y, sobre esta base, establecer las características de distribución del radionucleido en el cuerpo. Tal característica puede revelar el lugar donde está localizado un tumor, o qué región del pulmón no recibe irrigación sanguínea, o (si también se vigilan las variaciones en función del tiempo) si el ciclo cardíaco de bombeo es normal.

El primer dispositivo automático de obtención de imágenes fue el "aparato de exploración rectilínea", disponible en el comercio a mediados de los años 50. Un pequeño detector de centelleo (un cristal de yoduro de sodio de 2,5 cm de diámetro, acoplado a un tubo fotomultiplicador) se suspendía sobre la parte a examinar del cuerpo, con un colimador frontal de plomo para que llegaran al detector únicamente las radiaciones alineadas con su eje. Se accionaba mecánicamente el detector para que explorara el cuerpo en un lento movimiento de vaivén, de manera que examinara, por turno, todos los puntos de una zona rectangular de interés. Los impulsos electrónicos generados por la incidencia de los rayos gamma en el detector, si tenían una amplitud adecuada, hacían que un estilote acoplado al detector marcara puntos en una hoja de papel. Al término de las mediciones, el papel mostraba una dispersión de puntos que representaban,

en dos dimensiones, la forma de distribución del radionucleido en el cuerpo. La representación era imperfecta debido a muchas razones — colimación incompleta; demasiados pocos rayos gamma detectados, insuficientes para definir la forma; y carencia de datos de la tercera dimensión. Sin embargo, podía tener valor médico, a condición de que la forma de la distribución no se alterase significativamente en el curso de la medición, que duraba 15 a 30 minutos. Los circuitos eran sencillos — una decenas de tubos de vacío y las funciones eran también sencillas: amplificación de impulsos, selección de amplitud y recuento, además de la fuente de alimentación.

A principios de los años 1960 apareció un nuevo dispositivo de obtención de imágenes: la "cámara gamma". Después de 20 años y de numerosas mejoras, sigue siendo el instrumento de obtención de imágenes predominante en los países desarrollados, aunque el número de aparatos de exploración rectilínea utilizados en la mayoría de los países en desarrollo es muy superior. En la cámara gamma el detector es siempre el cristal de yoduro de sodio, aunque de diámetro mayor (actualmente llega hasta 50 cm), acoplado a muchos fotomultiplicadores, y el aparato es estacionario. Su colimador es también de plomo, poseyendo numerosos orificios paralelos que permiten a cada punto de la faz del detector explorar únicamente la parte del cuerpo expuesta directamente frente al instrumento. Como en el aparato explorador, cada haz de rayos gamma que incide en el detector genera un impulso eléctrico. Pero en la actualidad, con este dispositivo, los circuitos electrónicos analizan el impulso no solo para determinar si su amplitud es aceptable, sino también para determinar *dónde* los rayos gamma inciden en el detector. En otros términos, la distribución espacial se descifra electrónicamente, y no con el movimiento mecánico del aparato explorador. Por último, se registra la posición, que al principio consistía en un punto móvil en una pantalla de televisión, pero que ahora se presenta más corrientemente en un mapa, en una memoria electrónica. El descifrado electrónico de posición ofrece numerosas ventajas. La imagen del órgano aparece en su totalidad (por ejemplo, el corazón) en el campo de visión, de manera que si se registra una rápida sucesión de imágenes (por ejemplo, una cada 0,1 segundo), se obtiene la distribución temporal, así como la espacial, del trazador en el corazón en actividad. Cuando se acopla la cámara a una computadora es posible obtener electrónicamente una imagen completa: se puede comparar el número de recuentos registrados en cualquier zona secundaria de interés con los de otra zona, o con los de la misma zona en la imagen precedente; se pueden deducir automáticamente isolíneas de color que sirven para seleccionar zonas secundarias de interés.

* Jefe de la Sección de Aplicaciones Médicas de la División de Ciencias Biológicas del Organismo.



Imágenes obtenidas con la cámara de positrones de secciones del cerebro humano en las que se observan los cambios en la región óptica de la corteza correspondientes a: ojos cerrados, estímulo de luz blanca, y escena visual compleja de un parque. [De M.E. Phelps et al., *Positron Computed Tomography*, en: *Medical Radionuclide Imaging 1980*, Vol.1, p.199, OIEA, Viena (1980)].

Inicialmente el descifrado electrónico de posición también presentaba inconvenientes: por ejemplo, las imperfecciones del detector resultaban en una distorsión espacial de la imagen. Pero este es precisamente el tipo de problemas que se puede corregir mediante la electrónica moderna: se almacena en memoria un mapa de la distorsión que se utiliza para rectificar la posición descifrada de cada uno de los rayos gamma registrados.

Por último, con ayuda de otras configuraciones del detector y cómputos electrónicos adicionales, ha sido posible desde 1975 determinar la distribución tridimensional de radionucleidos en el cuerpo. (El Premio Nobel en medicina concedido en 1975 acredita la estrategia de la computación; si bien las ideas fundamentales ya existían desde los primeros años de este siglo, no se aprovecharon porque su aplicación no era práctica sin la computadora.) Si el radionucleido es del tipo que emite positrones, es posible obtener imágenes tridimensionales especialmente buenas. Quizás el adelanto más reciente en la obtención de imágenes por radionucleidos se haya logrado con la "cámara de positrones". Se ha obtenido una imagen cuantitativa tridimensional con una resolución de unos 10 mm de la tasa metabólica de la glucosa en diversas regiones del cerebro, junto con su dependencia con respecto al pensamiento en que momentáneamente se concentraba el sujeto.

Los instrumentos para la obtención de imágenes que acabamos de pasar en revista son muy variados por su tecnología. Como base de referencia, cabe observar que el precio corriente de un aparato explorador, de una cámara gamma computadorizada y de una cámara de positrones, es aproximadamente de 25 000, 200 000 y 1 000 000 de dólares, respectivamente.

Veinticinco años de progresos

Se ha podido dar aplicación práctica a la mayor capacidad de los instrumentos para la obtención de imágenes gracias, ante todo, a los adelantos logrados en la electrónica. En la época de los primeros aparatos exploradores, el dispositivo electrónico de base era el tubo de vacío — que costaba unos pocos dólares, que tenía dimensiones de pocos centímetros, un consumo energético de algunos vatios, y una vida útil que oscilaba entre unos meses y un año o dos. Al final de los años 50 fueron reemplazados por los transistores. Estos costaban unos pocos dólares, sus dimensiones eran de algunos milímetros, su consumo energético se medía en décimas de miliwatios, y su vida útil en años. A principios de los años 60, los "circuitos integrados": es decir, varios componentes básicos — transistores, resistores, capacitores — montados juntos e interconectados, en una plaqueta de silicona, reemplazaron a su vez a los transistores empleados separadamente. Ya no era necesario conectar a mano circuitos de cable

a cada componente por separado. Este proceso de "integración" continúa todavía hoy día con ímpetu. Desde 1960 el número de componentes de un circuito integrado se ha duplicado cada año, y en la actualidad es del orden de un millón. Es notable que el coste, el tamaño y el consumo energético, así como la probabilidad de fallo de circuitos totalmente integrados sigan siendo aproximadamente los mismos que los de los transistores primitivos, lo que significa que por componente transistor o por función lógica, los mismos han disminuido desde 1960 en un factor de varios millares. La velocidad de funcionamiento del circuito ha aumentado en un orden comparable.

No solo los circuitos se han hecho cada vez más compactos, con las ventajas concomitantes ya descritas, sino que su organización lógica también se ha transformado, especialmente con la aparición del microprocesador, alrededor de 1970. Un microprocesador corresponde a una unidad central de proceso (CPU) — en una sola plaqueta de silicona. Si bien en los comienzos fue necesario añadir numerosos circuitos integrados adicionales (generadores de intervalo, memorias, interfaces, etc.) al conjunto de una computadora completa, actualmente se puede fabricar todo el sistema en una sola plaqueta de silicona de algunos milímetros de espesor.

Los instrumentos de medicina nuclear fabricados a partir de estos componentes increíblemente mejorados reflejan la demanda del mercado en los países desarrollados. Se han observado tres tendencias predominantes. En primer lugar, con respecto a cualquier clase particular de instrumento, las fuerzas del mercado no han producido dispositivos de rendimiento constante a precios muy reducidos, sino más bien elementos de rendimiento inmensamente mejorado a precios aproximadamente constantes. Para los países en desarrollo ha resultado de particular importancia la reducción en la frecuencia de fallos. En segundo lugar, los adelantos técnicos permiten introducir periódicamente clases nuevas de instrumentos (por ejemplo, aparatos exploradores, cámaras gamma, cámaras de positrones) a precios sorprendentemente más altos. En tercer lugar, el núcleo de casi todos los instrumentos son los microprocesadores, de manera que la característica dominante del diseño del instrumento ya no son los dispositivos físicos, sino más bien los programas de computadora (software). Si bien es probable que estas tendencias perduren durante algún tiempo, no lo es menos que la revolución se prolongue en el porvenir; los usuarios de los instrumentos y los encargados de los servicios de apoyo para los mismos, deberán proyectar sus planes teniendo en cuenta cambios continuos y rápidos.

La medicina nuclear y el programa del Organismo

Cabe interrogarse sobre la manera en que los países en desarrollo y el Organismo, en la medida en que responde a sus necesidades, reaccionan positivamente ante esta revolución de la electrónica y sus consecuencias en la medicina nuclear. Para ellos aprovechar tan vertiginoso progreso es algo así como tratar de beber un sorbo de agua del chorro que sale de una manguera de incendios. A pesar de todo, antes

de dejarse abatir por los problemas, es importante admitir que el efecto principal es muy favorable, y que es de esperar que lo sea todavía más favorable.

En 1975, la Sección de Aplicaciones Médicas identificó manifiestamente la instrumentación como un componente de su programa. Entre otras actividades, la Sección inició el estudio de unos 200 laboratorios de Asia, América Latina y África para averiguar los instrumentos empleados y, durante un período de 6 meses, los problemas de mantenimiento planteados, determinar si se habían resuelto y el método utilizado. En el marco de sus programas de cooperación técnica y contratos de investigación cada año el organismo suministra equipo de medicina nuclear por valor de varios miles de dólares. Ejecuta proyectos de cooperación técnica y contratos de investigaciones que tratan directamente de la instrumentación de medicina nuclear, especialmente en relación con el control de calidad y el mantenimiento. Participa activamente en cursos de capacitación relacionados con el mantenimiento y, por último, su laboratorio está siempre dispuesto a ensayar ideas y dispositivos.

Una consecuencia inevitable de la revolución electrónica en la instrumentación de medicina nuclear en los países en desarrollo es que, por lo general, los instrumentos van quedando anticuados en comparación con los que se emplean en los laboratorios avanzados. Una de las razones es que, sobre bases exclusivamente financieras, los países en desarrollo no pueden dar de baja los instrumentos muy frecuentemente. Más importante todavía es que la nueva clase de instrumentos disponibles en el mercado son generalmente más costosos, y no pueden permitirse el lujo de adquirirlos. El hecho de que los aparatos de exploración cuestan corrientemente una quinta parte del precio de las cámaras gamma, significa que los laboratorios de los países en desarrollo han continuado adquiriéndolos después de que este modelo ha desaparecido virtualmente en los países desarrollados.

Una consecuencia del retraso en materia de equipo es el desfase en la capacitación. Cualquier becario que siga hoy día un curso de capacitación en países avanzados encontrará difícilmente un aparato de exploración, a pesar de que muchos de ellos deben regresar a laboratorios de su país en los cuales éste es el único tipo de instrumento para obtención de imágenes de que disponen. Otra consecuencia es que los elementos que equipan un laboratorio han de comprender probablemente toda una gama de tecnología, desde los procesadores hasta los primitivos circuitos integrados, hecho que crea una considerable complicación en lo que respecta a las piezas de repuesto y los conocimientos necesarios para su mantenimiento.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento sigue siendo un problema importante, a pesar de la fiabilidad mejorada de los instrumentos modernos. Dentro del marco del estudio del Organismo, los informes indicaban que del 10 al 20% de los instrumentos están en un momento u otro fuera de servicio, y probablemente la situación real es peor aún. Conviene considerar separadamente el concepto de mantenimiento preventivo y el de reparaciones.

El medio ambiente en el cual se utilizan los instrumentos en los países en desarrollo es menos favorable que el medio hipotético para el cual se diseñaron los instrumentos. El rendimiento de los circuitos integrados está más afectado por las altas temperaturas que el de los tubos de vacío y un rápido cambio de temperatura (por ejemplo, el aumento que se produce como consecuencia del fallo del sistema de aire acondicionado) puede poner en peligro el detector de una cámara gamma. Un alto grado de humedad, ya sea por causas naturales o como consecuencia de la refrigeración por aire sin la concomitante deshumidificación, puede resultar grave. También tienen importantes papeles la arena, los insectos y los roedores. Las condiciones locales de la alimentación eléctrica son probablemente más importantes que cualquiera de estos problemas. En comparación con los instrumentos que funcionan con tubos de vacío, los circuitos integrados sufren daños mucho más fácilmente a causa de cambios eléctricos bruscos, y tales sobretensiones son mucho más comunes en los sistemas eléctricos de los países en desarrollo que en los países industrializados.

El Organismo ejecuta actualmente un proyecto de cooperación técnica interregional y una serie de contratos de investigación para mejorar el mantenimiento. En cada uno de aproximadamente 20 países, se ha designado un coordinador nacional para que supervise el programa, y se han escogido dos o tres laboratorios pilotos para ensayar las posibilidades de mejora. Se acuerda una importancia especial al medio ambiente, en la medida en que se considera que éste constituye un grave riesgo que se podría eliminar casi radicalmente. Se recomienda a los laboratorios que vigilen la temperatura, la humedad y los niveles de tensión y se les suministra equipo de medición adecuado cuando es necesario. Se subraya la importancia del control de la humedad. Más especialmente, se les ha facilitado equipo para el acondicionamiento de la alimentación eléctrica de la red, acompañado de una invitación para su empleo. El equipo comprende estabilizadores, supresores de cambios bruscos y relés de desconexión. Estos últimos son dispositivos que desconectan el instrumento de la línea de alimentación en el instante en que se produce un fallo de alimentación eléctrica, para que no esté expuesto a los cambios de tensión que tienen lugar por lo general cuando se restituye la energía eléctrica. Si se prestara atención concienzuda a tal protección se podrían evitar muchos fallos.

En los países en desarrollo, en esta fase de la revolución electrónica, las reparaciones están corrientemente a cargo de los agentes de revisiones del fabricante, que son los únicos que poseen los conocimientos, equipos de prueba y piezas de recambio. Con frecuencia este servicio está amparado por un contrato de mantenimiento, póliza de seguro que cuesta anualmente cerca del 5 al 10% del precio del instrumento. Por lo general, en los países en desarrollo el coste es más alto a causa de los gastos de viaje más importantes debido a las grandes distancias. Por esta razón, así como por la necesidad de "economizar" dinero, y por las dificultades con que tropiezan los compromisos plurianuales de fondos, raras veces se conciertan los

contratos de mantenimiento. Ello explica por qué no se encuentran a menudo agentes de servicio cuando se necesitan.

El empleo de recursos locales para las reparaciones es frecuentemente difícil. Los elementos más funcionales de los instrumentos modernos no se pueden reparar en caso de defecto; más bien se reemplaza el componente o el tablero de circuitos defectuosos. Sin embargo, se requiere cierta pericia para detectar cuál es el componente averiado y siempre se pueden reparar ciertos elementos, mecánicos o electrónicos, si se dispone de personal técnico competente y la confianza hija de la experiencia.

La adquisición de piezas de repuesto es una de las tareas más desalentadoras del mantenimiento. A causa de la gran diversidad de elementos de la electrónica moderna, y por el agrupamiento de funciones en circuitos integrados indivisibles o de tableros de circuitos impresos, ya no es probable que la pieza necesaria pueda adquirirse localmente. Si bien se puede enviar el encargo al fabricante a la velocidad de la luz, y recibir la pieza solicitada a la del sonido, las demoras aduaneras y las provocadas por los cambios de divisas pueden retrasar meses la transacción, aunque el costo de la pieza sea insignificante. El almacenamiento de piezas de repuesto es inútil, ya que nunca se necesita la mayor parte de las piezas almacenadas. Muy pocos laboratorios han abierto una cuenta de crédito limitada en la firma fabricante, o en un banco extranjero o una institución afín, o han elaborado trámites aduaneros que permitan la rápida obtención de las piezas; el ejemplo de estos laboratorios debería ser una fuente de inspiración para los demás. El Organismo trata de establecer un centro de abastecimiento de piezas de repuesto para los laboratorios pilotos que participan en los programas de mantenimiento. Inicialmente el encargo se debería enviar a un proveedor central situado en un lugar estratégico, cuyo funcionamiento se podría financiar con fondos del Organismo. La participación continua por parte de cada uno de los laboratorios podría depender de la restitución de dichos fondos. El objetivo sería el de someter a ensayo los procedimientos, y familiarizar a los laboratorios con la posibilidad de disponer rápidamente de piezas, con la esperanza de que, una vez habituados al sistema, terminarían por adoptarlo.

El Organismo respalda de distintas maneras la capacitación de ingenieros y técnicos electrónicos, en particular mediante becas y cursos de capacitación de ingenieros y técnicos electrónicos, en particular mediante becas y cursos de capacitación. El programa de cursos de capacitación debe seguir el ritmo de la revolución electrónica, cuyo centro de gravedad en poco menos de un decenio se ha desplazado de los dispositivos físicos (hardware) a los programas (software). Otro problema es la gran demanda de técnicos electrónicos especializados, a causa de la invasión de la electrónica en todos los aspectos de la vida diaria, con el resultado de que muchos beneficiarios de los cursos del Organismo abandonan rápidamente a sus empleadores originales (por lo menos se éstos son instituciones médicas). Para terminar con este tonel sin fondo, el programa del Organismo relativo a los instrumentos de medicina nuclear ha comenzado a experimentar con cursos destinados a "capacitar a los capacitadores".

Si es posible estimular al personal de electrónica profesionalmente competente de un centro nacional a que multiplique el número de sus técnicos mediante la capacitación de colegas locales, el resultado podría constituir un medio bien justificado, desde el punto de vista gastos, para completar la capacitación de especialistas en el extranjero.

En último término, la solución del problema de mantenimiento podría ser más bien una cuestión de psicología (el deseo de contar con un instrumento en buen estado de funcionamiento) y de organización (la movilización de las soluciones disponibles), más bien que de tecnología. Se ha encarecido a cada uno de los laboratorios piloto a que prepare un plan de mantenimiento: determinar cuáles son sus necesidades y los recursos de que se disponen en el laboratorio o en la comunidad; prever la adquisición de las piezas de repuesto; prever la capacitación indispensable del personal. Se podría sugerir que el Organismo llevara a cabo estudios análogos en relación con sus propias operaciones. Cabe preguntarse si, cuando facilita equipo, tiene la seguridad, por ejemplo, de que el equipo estará amparado por un contrato de mantenimiento (sufragado por el receptor o por el Organismo), o de que por lo menos existirá un depósito de crédito que permita al usuario adquirir rápidamente las piezas necesarias. Actualmente esto no ocurre con frecuencia.

Esfuerzo personal de ayuda

Muy pocos países en desarrollo cuentan con alguno de los principales instrumentos fabricados en los principales laboratorios, y mucho menos son los que disponen de aparatos de tipo comercial. Es difícil y costoso mantener actualizados los conocimientos, las piezas de repuesto y los equipos de ensayo ante la tecnología en tan rápido progreso y son pocos los incentivos para fabricar instrumentos anticuados. Sin embargo, es tentador imaginar que la fase actual de la revolución electrónica podría brindar nuevas oportunidades para la fabricación de instrumentos. Se ha estimado que el 80% del coste de un instrumento científico es atribuible hoy día a la dotación lógica (software) — que requiere imaginación más que cualquier otra cosa — y no a las dotaciones físicas (hardware). De allí que la inexistencia de dotación física o de divisas extranjeras para adquirirlos, debería ser un inconveniente menos difícil de salvar que hasta ahora en los países en desarrollo.

El Laboratorio del Organismo ha emprendido un proyecto a tal respecto, encaminado a facilitar un instrumento útil y a ensayar el concepto de ayuda con el esfuerzo personal. Si no es práctico diseñar y fabricar de nuevo un instrumento de gran rendimiento, y si la adquisición de piezas de repuesto en el extranjero plantea dificultades burocráticas insuperables, ¿sería entonces posible montar un instrumento adecuado a las condiciones locales a partir de productos de consumo de alta tecnología disponibles en el mercado local? El instrumento más indispensable en muchos laboratorios de medicina nuclear es un contador automático para

mediciones de radiactividad de muestras emisoras gamma — por ejemplo, para medir los millares de muestras preparadas anualmente en los procedimientos de radioinmunoanálisis. El Laboratorio del Organismo ha diseñado, construido y distribuido a los laboratorios de los países en desarrollo varios de esos contadores.

El contador propiamente dicho no proviene del mercado local de cada país, pero su construcción está al alcance de laboratorios de muchas comisiones nacionales de energía atómica. En su configuración actual consiste en un detector de centelleo de tipo pozo, dos analizadores monocanales de altura de impulsión, dos escalas de recuento, un icrómetro y un microprocesador. El cambiador automático de muestras se obtiene efectivamente en el mercado local — es un cargador de diapositivas Kodak tipo "carousel" (que cuesta 250 dólares de los Estados Unidos)*, diseñado para uso y abuso en los hogares de todo el mundo. El procesador de datos y el sistema de control proceden también del mercado local — se trata de un calculador programable Hewlett-Packard HP-41CV, con accesorios (1000 dólares de los Estados Unidos). Cuando se interconecta el sistema, el microprocesador dirige internamente el contador, mientras que el calculador supervisa el cambio de muestras y procesa los datos. En la opinión no imparcial del autor, el proceso de datos es mejor que el conseguido con cualquier sistema comercial de recuento ortodoxo disponible corrientemente. En caso de fallo del cambiador de muestras y del calculador, se puede utilizar manualmente el contador. Si solo falla el cambiador de muestras, puede continuar el proceso automático de datos, efectuándose a mano el cambio de muestras. El contador y el calculador se alimentan con baterías recargables, con lo cual son casi invulnerables a las alteraciones del suministro eléctrico, comprendidas las interrupciones de algunas horas de duración. Si la alimentación eléctrica se interrumpe temporalmente durante la ejecución automática, deteniéndose con ello el cambio de las muestras, el microprocesador se para, sin error, hasta que se reanude el cambio de muestras al restituirse la corriente eléctrica. El precio de la versión comercial de este instrumento es más o menos la mitad del de un contador de muestras automático normal.

La revolución continuará

La revolución electrónica ha producido y continúa produciendo rápidos cambios en la tecnología de la instrumentación de la medicina nuclear, ofreciendo posibilidades y fiabilidad inmensamente superiores. Junto con las ventajas se presentan también ciertos inconvenientes para los países en desarrollo, mercado relativamente reducido, para el cual no se han optimizado los instrumentos. Pueden tomarse ciertas medidas para salvar estos inconvenientes, algunas técnicas y otras institucionales, medidas que el Organismo procura introducir.

* Esta utilización del proyecto de diapositivas fue propuesta por W.J. Palenscar.