

Estudio comparativo de equipos fijos de pedestal y su aplicación en la detección del tráfico incontrolado de material radiactivo en aeropuertos

L. PUJOL (*), M. J. SUÁREZ-NAVARRO (**), J. A. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ (**) y M. GARCÍA-GALLUDO (**)

RESUMEN En este trabajo se analiza la respuesta de tres equipos comerciales, diseñados para detectar el tráfico ilícito o el desplazamiento involuntario de material radiactivo en aeropuertos cuando es transportado por los pasajeros. Se han comparado tres instrumentos fijos de pedestal: el equipo APM de Bicron, el equipo GR-606 de Exploranium y el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline. En esta evaluación inicial, realizada en el Laboratorio de Ingeniería Nuclear de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos, se observó que el equipo FHT-1372 presentó una respuesta de detección más rápida, sensible y permitió la medida de tasa de dosis total y tasa de dosis artificial. Este equipo fue instalado en la salida de la aduana de pasajeros del aeropuerto internacional de Barajas durante un periodo operativo de 108 días en el año 2002 y pasaron un total de 1.339.931 personas. Este periodo se dividió en 5 sesiones para poder establecer los niveles de investigación adecuados para detectar una posible incidencia de material radiactivo, que finalmente se fijaron en 110 nSv/h para la tasa de dosis total y 25 nSv/h para la tasa de dosis artificial. Durante dicho periodo se detectaron 39 posibles incidencias por encima del límite de investigación establecido para las diferentes sesiones, 5 de ellas con un valor 10 veces superior al fondo ambiental de la sala donde se instaló el equipo (alrededor de 90 nSv/h) y ninguna superó el nivel de 100 μ Sv/h a 1 m de distancia que la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA) establece como límite para el transporte lícito de material radiactivo.

COMPARATIVE STUDY OF FIX-INSTALLED MONITORING INSTRUMENTS AND ITS APPLICATION IN DETECTING UNCONTROLLED TRAFFICKING OF RADIOACTIVE MATERIALS AT AIRPORTS

ABSTRACT *In this paper we analyze the response of three commercial equipments designed to detect illicit trafficking or inadvertent movement of radioactive materials at airports when carried by passengers. We compared three fix-installed instruments: APM (Bicron), GR-606 (Exploranium), and FHT-1372 (Thermo Eberline). In this initial evaluation, conducted at the Laboratory of Nuclear Engineering of the School of Civil Engineering, it was observed that the FHT-1372 introduced a faster detection response, sensitive and allowed the measurement of total dose rate and artificial dose rate. This equipment was installed at the exit from customs passenger of Barajas international airport operating for a period of 108 days in 2002 with a total number of 1,339,931 people. This period was divided into 5 sessions to establish suitable investigation levels to detect a possible incident of radioactive material, which was finally set at 110 nSv/h to total dose rate and 25 nSv/h for artificial dose rate. During this period 39 possible incidents were detected above the investigation level established, 5 of them with a value 10 times the environmental background of the room where the equipment was installed (about 90 nSv/h), and no level exceeded 100 μ Sv/h at 1 m distance, which is the limit for legal transport of radioactive materials from the International Atomic Energy Agency (IAEA).*

Palabras clave: Detectores de radiación, Equipos fijos de pedestal, Radiactividad, Tráfico incontrolado, Fronteras, Aeropuertos.

Keywords: Radiation detectors, Pedestrian monitors, Radioactivity, Illicit trafficking, Borders, Airports.

1. INTRODUCCIÓN

La prevención, detección y actuación del tráfico incontrolado de material radiactivo engloba tanto al tráfico ilícito como al

desplazamiento involuntario de muestras radiactivas. La Organización Internacional de la Energía Atómica define tráfico ilícito como: “un acto que consista en recibir, poseer, utilizar, transferir o evacuar materiales radiactivos sin autorización” (OIEA, 2004). Sin embargo, en muchos casos se ha demostrado que se han pasado ilegalmente materiales radiactivos a través de las fronteras internacionales debidos a desplazamientos involuntarios y no a verdaderos propósitos delictivos.

(*) Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CEDEX). Ministerio de Fomento.

(**) E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Ejemplo de ello pueden ser personas con algún tratamiento médico (Kouzes y otros, 2003), materiales radiactivos que han pasado a través de las fronteras internacionales mezclados con chatarra (Lubenu y Yusko, 1998), y envíos legales de materiales radiactivos.

Algunos países, para actuar contra el tráfico ilícito y el desplazamiento involuntario de material radiactivo, han colocado en sus fronteras o en puntos estratégicos, equipos de detección de radiactividad de características especiales para prevenir y detectar el mismo. En particular, para realizar el control radiológico de pasajeros y su equipaje en aeropuertos es necesario instalar instrumentos fijos de pedestal con detectores muy sensibles a las emisiones gamma. En el caso del control radiológico para los vehículos y los contenedores del aeropuerto se necesitarían detectores tipo pórtico. Los instrumentos fijos de pedestal se caracterizan por ser equipos ligeros, se trasladan fácilmente y no es necesario colocar un detector a cada lado de la vía por la que circulan los pasajeros. Cuando los pasajeros, que pasan frente a ellos, transportan una muestra radiactiva se activa una alarma luminosa y sonora. La respuesta del equipo ha de ser rápida (para no interrumpir el paso normal de los pasajeros), sensible (para detectar las muestras situadas hasta 2 m de distancia) y fiable (para no producir alarmas falsas debidas a fluctuaciones del fondo ambiental donde está ubicado el equipo, cuando no hay paso de muestras radiactivas).

El OIEA y el Gobierno austriaco patrocinaron conjuntamente un estudio piloto sobre aspectos prácticos de los instrumentos de vigilancia en las fronteras. Este estudio se llamó Programa de evaluación para la detección de la radiación en el tráfico ilícito (ITRAP, acrónimo de Illicit Trafficking Radiation Detection Assessment Program) (Beck, 2000). En particular, este estudio sirvió para formular las características de funcionamiento de los instrumentos de vigilancia (Beck y otros, 2002).

En el trabajo que se presenta en este estudio realizado por el Laboratorio de Ingeniería Nuclear de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos, se han seleccionado para su evaluación y comparación tres equipos fijos de pedestal comerciales que participaron en el programa ITRAP, y que son muy sensibles a las emisiones gamma. Estos equipos han sido los siguientes: APM de Bicron, GR-606 de Exploranium y FHT-1372 de Thermo Eberline (González-González y otros, 2003b).

2. DETECTORES DE RADIACIÓN Y TIPOS DE ALARMAS

2.1. INTRODUCCIÓN

Los monitores de radiación fijos de pedestal para personas se conocen a menudo como monitores de pórtico pero son de tamaño más reducido que los utilizados para vehículos y/o contenedores y, por lo general, se componen de un conjunto de detectores instalados en uno o dos pilares verticales con dispositivos electrónicos. Para poder detectar la presencia de materiales radiactivos, la radiación que éstos emiten debe traspasar cualquier bulto o persona en el que se encuentren. En la práctica esto significa que posiblemente no se detecten los materiales que sólo emiten radiación alfa, radiación beta de baja energía y/o radiación gamma de baja energía (OIEA, 2004). Además, estos instrumentos de vigilancia miden el nivel de radiación (gamma o neutrónica) existente mientras una persona que se encuentra en la zona de detección va pasando y compara este nivel con el de la radiación de fondo cuando la zona no está ocupada. En la actualidad, sólo existen dos tipos de detectores que pueden detectar sustancias radiactivas que cumplen esas características especiales (mues-

tras que pueden estar blindadas, sensibles a las emisiones gamma, y en movimiento) y que se utilizan para controlar el tráfico ilícito o el movimiento incontrolado: los detectores de centelleo sólido de NaI(Tl) y los detectores de centelleo plástico (Siciliano y otros, 2005). En general, los detectores de PVT son más utilizados en la construcción de los detectores fijos de pedestal que los de NaI(Tl), principalmente por razones técnicas y económicas. Los detectores de PVT son sensibles a las emisiones gamma y a los neutrones, pueden tener una gran superficie y son estables frente a las variaciones de temperatura y humedad (González-González y otros, 2003a).

2.2. DETECTORES DE NAI(TL)

Los detectores de NaI(Tl) de centelleo sólido inorgánico, son cristales que tienen pequeñas impurezas de talio. Estos cristales suelen tener forma cilíndrica, con diámetros y longitudes que varían de 2" a 16". Las emisiones radiactivas excitan sus electrones, pasándolos de la banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones de los niveles excitados se desexcitan emitiendo fotones de luz visible que un tubo fotomultiplicador transforma en un impulso eléctrico. Los cristales de NaI(Tl) son delicados y se deterioran fácilmente con choques mecánicos o variaciones térmicas, por lo que se han de encapsular para evitar su deterioro por la absorción de la humedad ambiental. Normalmente se emplean para detectar las emisiones gamma (Knoll, 2000).

2.3. DETECTORES PLÁSTICOS

Los detectores de centelleo sólido orgánico (detectores plásticos) son polímeros transparentes formados por hidrocarburos, que tienen disueltas de forma homogénea pequeñas cantidades de sustancias (impurezas) repartidas en el plástico. El polímero más empleado para los detectores fijos de pedestal es el poliviniltolueno (PVT). Las emisiones gamma que atraviesan e interaccionan con el detector transmiten parte de su energía a los electrones del detector de plástico, que a su vez excitan su estructura, que se transfiere a las impurezas, que se desexcitan emitiendo luz. Los fotones se transmiten por el plástico con facilidad y su atenuación es muy reducida. La mayoría de las interacciones de las emisiones gamma con el detector son por efecto Compton, debido al bajo número atómico del carbono e hidrógeno del plástico, en menor medida por efecto fotoeléctrico, dominante sólo para bajas energías o para rayos X y casi despreciable para la creación de pares. Los plásticos se mecanizan con facilidad en bloques rectangulares o cilíndricos de gran volumen, con un espesor de 4 a 10 cm, y con una superficie variable de 0,1 m² a 1 m². Para emplearlo como detector se pule su superficie, se encapsula con una fina lámina de aluminio pulida en su parte interior, se forra con una lámina semirígida negra, que puede ser cinta aislante u otro material y se acopla a uno o a varios tubos fotomultiplicadores (Knoll, 2000).

2.4. TIPOS DE ALARMAS

Los pórticos están concebidos para detectar automáticamente la presencia de materiales radiactivos llevados por peatones o transportados en vehículos. Para ello, los sistemas de vigilancia miden el nivel de radiación (gamma o neutrónica) existente mientras una persona o vehículo se encuentra en la zona de detección y comparan este nivel con el de la radiación de fondo que se mide y actualiza mientras la zona de detección no está ocupada. De forma que un instrumento sólo debe dar una señal de alarma si se supera un nivel de radiación determinado.

Hay tres tipos principales de alarma de interés fundamental (OIEA, 2004):

- Alarmas falsas: producidas por fluctuaciones estadísticas del fondo ambiental o bien por fallos electrónicos del equipo de detección.
- Alarmas reales: son las alarmas generadas por un aumento real del nivel de radiación y se derivan del desplazamiento involuntario o tráfico ilícito de material radiactivo.
- Alarmas inocentes: alarmas que originan un incremento del nivel de radiación, pero que no son debidas al desplazamiento involuntario o tráfico ilícito de material radiactivo. Estas alarmas pueden ser debidas a la presencia de radionucleidos administrados con fines médicos, a materiales radiactivos de origen natural (NORM) o bien a envíos legales de material radiactivo.

Es importante fijar los niveles de investigación de los equipos para detectar las alarmas reales, las alarmas inocentes y para que no se produzcan demasiadas alarmas falsas (1 cada 10.000 pasajeros). Por ello, la selección de un nivel de investigación es necesaria, entendiendo como tal un nivel establecido para realizar una investigación más exhaustiva, que supone fijar adecuadamente el nivel de alarma del instrumento de vigilancia. Un nivel de alarma típico establecido en los pódicos comerciales es el siguiente (Gonzalez-Gonzalez, 2003b; Ely y otros, 2004):

$$A = F + K\sqrt{F} \quad (1)$$

siendo:

A = nivel de alarma, en cps (cuentas por segundo).

F = fondo ambiental medio del equipo, en cps.

\sqrt{F} = desviación típica del fondo, en cps.

K = es un factor multiplicativo, que determina el valor que está por encima del nivel del fondo, en unidades de desviación típica.

Teniendo en cuenta, que para la vigilancia de peatones, con equipos de pedestal, la OIEA recomienda fijar el nivel de investigación en 1,2 veces el nivel del fondo ambiental medido por cada equipo (OIEA, 2004) según los resultados obtenidos en el Programa ITRAP (Beck, 2000). Tenemos que:

$$A = 1,2 \cdot F \quad (2)$$

Igualando las ecuaciones (1) y (2), obtenemos la siguiente expresión para la constante K, en unidades de desviación típica del fondo:

$$K = 0,2 \cdot \sqrt{F} \quad (3)$$

De acuerdo con esta expresión, los valores de las alarmas se expresan generalmente en unidades sigma o, lo que es lo mismo, en desviaciones típicas del fondo.

3. EXPERIMENTAL

3.1. FUENTES RADIATIVAS

Se han empleado fuentes radiactivas, emisoras gamma recomendadas por el OIEA dentro del programa ITRAP: americio-241 (42 kBq), cesio-137 (30 kBq), cobalto-60 (40 kBq), mineral de uranio (de aproximadamente 50 kBq), mineral de torio (de aproximadamente 30 kBq) y radio-226 (40 kBq).

3.2. EQUIPOS EMPLEADOS

Se analizan tres equipos comerciales para detectar material radiactivo transportado por pasajeros: APM de Bicron, GR-606 de Exploranium y FHT-1372 de Thermo Eberline (Figura 1). En la tabla 1 se muestran las características resumidas de los tres equipos.



FIGURA 1. Equipos analizados: APM de Bicron (izquierda), GR-606 de Exploranium (centro) y FHT-1372 de Thermo Eberline (derecha).

| Equipo | Tipo detector | Tamaño (mm) | Volumen (litros) | Medidas por segundo | Número canales |
|-----------------------------|---------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------|
| APM de Bicron | NaI(Tl) | 75 x 75 | 0,33 | 16 | 1 |
| GR-606 de Exploranium | PVT | 800 x 250 x 50 | 10 | 10 | 1 |
| FHT-1372 de Thermo Eberline | PVT | 220 x 220 x 100 | 4,84 | 3 | 4 |

TABLA 1. Resumen de las características de los tres equipos fijos de pedestal utilizados en este trabajo.

3.2.1. Descripción del equipo APM de Bicron

El equipo APM de Bicron está formado por un sistema de detección situado en un pedestal, un sensor de presencia, una cámara de vídeo y un ordenador. El sistema de detección emplea un detector cilíndrico de NaI(Tl) de 3" x 3", con un fotomultiplicador de 3" de diámetro, se conecta al zócalo la alta tensión, el preamplificador, el multicanal y un microprocesador de control con conexión a un ordenador externo (Figura 2). El equipo realiza 16 medidas por segundo. Después de cada alarma se bloquea durante 5 segundos para medir el fondo ambiental. El sistema verifica de forma automática el nivel de la radiación de fondo. El nivel de radiación emitido por una fuente se compara con el nivel de fondo y genera una alarma cuando una o varias medidas superan el nivel medio del fondo con unas condiciones prefijadas. Los resultados acumulados en cada segundo, el nivel de fondo, y el estado de alarma se graban en un fichero del ordenador. Las alarmas se graban en un fichero independiente junto con la imagen de la cámara de vídeo.

3.2.2. Descripción del equipo GR-606 de Exploranium

El equipo GR-606 está formado por un sistema de detección situado en un soporte. El equipo de detección emplea un detector de centelleo plástico de poliviniltolueno (PVT) de 800 x 250 x 50 mm con dos tubos fotomultiplicadores de 2" de diámetro, y una tarjeta que tiene integrada la alta tensión, los preamplificadores, el circuito de coincidencias y los discriminadores, todos controlados por un microprocesador con conexión a un ordenador personal externo (Figura 3). El equipo re-



FIGURA 2. Sistema de detección APM de Bicron. En su interior se observa el detector de NaI(Tl) y la electrónica asociada.



FIGURA 3. Sistema de detección GR-606 de Exploranium. El interior está provisto de un detector de grandes dimensiones de PVT con su electrónica asociada.

aliza 10 medidas por segundo. El valor del fondo ambiental lo calcula como el promedio obtenido cada 20 segundos. Se produce una detección cuando hay una, dos o tres medidas seguidas (según se programe) con un incremento anormal sobre el fondo y, en este caso, se activa una alarma.

3.2.3. Descripción del equipo FHT-1372 de Thermo Eberline

El equipo FHT-1372 emplea un detector de PVT de 220 × 220 × 100 mm con un fotomultiplicador de 2" de diámetro cuyo zócalo tiene integrado en un módulo: la alta tensión, el preamplificador, un discriminador, un termómetro y un microprocesador de control con conexión externa a un ordenador personal (Figura 4). El sistema realiza tres medidas cada segundo en cuatro canales de energía (discriminadores) que le permite calcular la tasa de dosis natural y artificial. Después de cada medida el equipo no queda bloqueado pues emplea como medida de referencia las medidas anteriores del fondo. El sistema está formado por dos cajas fijas a un soporte metálico, una para el equipo de detección y otra con una fuente de alimentación autónoma y un ordenador personal. Los resultados de la dosis medida y de las alarmas producidas se muestran en pantalla y se almacenan en el ordenador personal.

El funcionamiento de los cuatro canales de energía es el siguiente: el discriminador C1 está situado en 60 keV para eliminar el ruido electrónico y las bajas energías, el discriminador C2 está situado en 660 keV para eliminar las detecciones de las energías inferiores al cesio-137 y permitir la medida de otros radionucleidos artificiales como el cobalto-60, el discriminador C3 está situado en 1254 keV, para medir las detecciones de los radionucleidos naturales de la serie del uranio y del torio, y el potasio-40, y el discriminador C4 está situado en 3075 keV para medir sólo las detecciones de las radiaciones cósmi-



FIGURA 4. Sistema de detección FHT-1372 de Thermo Eberline. El interior está provisto de un detector de grandes dimensiones de PVT con su electrónica asociada.

cas. Con las relaciones de estos cuatro canales o discriminadores, se obtienen nuevos parámetros que emplean distintos algoritmos para identificar las emisiones artificiales de las naturales, y compensar las variaciones del fondo. Con estos datos el equipo proporciona la medida de la tasa de dosis total (suma del valor de la tasa de dosis natural y de la tasa de dosis artificial) y el valor de la tasa de dosis artificial cada segundo. La tasa de dosis artificial se calcula suponiendo que es para una muestra de cesio-137 o de menor energía. Estos valores se pueden expresar en cps o mediante el factor de conversión correspondiente en nSv/h. Los valores obtenidos se graban en el ordenador. Cuando no hay alarma se graba el valor medio de 60 medidas. Cuando hay alarma se graban los valores cada segundo. El sistema de grabación y el programa se realizó y optimizó en el propio Laboratorio y se añadió al equipo.

3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio se han realizado en el Laboratorio de Ingeniería Nuclear de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos (Departamento de Hidráulica y Energética). Cada uno de los tres equipos se ha conectado a un ordenador personal de forma independiente para poder variar sus parámetros, obtener con detalle su respuesta gráfica y numérica y grabar los resultados obtenidos. Se han realizado los siguientes ensayos:

1. Se ha medido el fondo ambiental del laboratorio con los tres equipos en cps (cuentas por segundo) y, en particular, con el equipo FHT-1372, además en tasa de dosis total y en tasa de dosis artificial en unidades de nSv/h.
2. Se ha fijado el nivel de alarma de cada equipo, en unidades de desviación típica del fondo, utilizando la recomendación de la OIEA, como 1,2 veces el valor de fondo de cada equipo.
3. Se han verificado las detecciones y alarmas de los equipos para excluir las alarmas falsas, pasando las muestras radiactivas naturales y artificiales frente a los detectores a una distancia inferior a 30 cm y con una velocidad próxima a 1 m/s (velocidad del pasajero).
4. Respecto al equipo FHT-1372 se ha comprobado la correcta separación de la tasa de dosis total de la tasa de dosis artificial mediante radionucleidos artificiales y naturales.
5. También se ha estudiado la información energética que puede proporcionar el equipo FHT-1372 pasando una fuente de cobalto-60 a 0,5 m del detector y una fuente de cesio-137 a 0,2 m y a 0,5 m del detector. Para ello se ha calculado la relación entre la tasa de dosis total y la tasa de dosis artificial más la tasa de dosis de fondo ambiental (Δ), utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{D_{total}}{D_{artificial} + D_{fondo}} \quad (4)$$

Donde D_{total} es la tasa de dosis total, $D_{artificial}$ es la tasa de dosis artificial y D_{fondo} es la tasa de dosis cuando no hay muestra radiactiva, en nSv/h.

6. Se ha comparado la respuesta de los tres equipos y se ha seleccionado uno de ellos para instalarlo en la aduana del aeropuerto internacional de Barajas. Para realizar esta comparación se ha calculado el incremento relativo de las detecciones (I) frente al valor de la raíz cuadrada del fondo (esto es, en unidades de desviación típica) utilizando la siguiente expresión:

$$I = \frac{C_{Máx} - F}{\sqrt{F}} \quad (5)$$

donde $C_{Máx}$ es la medida máxima, expresada en cps, realizada en un segundo; F es el valor del fondo (en cps).



FIGURA 5. Equipo fijo de pedestal FHT-1372 de Thermo Eberline instalado en la salida de la aduana de pasajeros del aeropuerto internacional de Barajas.

3.4. ENSAYOS EN EL AEROPUERTO

El equipo FHT-1372 de Thermo Eberline se instaló en la salida de la aduana de pasajeros del aeropuerto internacional de Barajas (Figura 5). El equipo no tenía activada la alarma luminosa ni sonora, y se recogían las grabaciones de los datos semanalmente. El equipo se situó próximo al mostrador de la aduana de la zona “nada que declarar”. En ese emplazamiento los pasajeros tienen limitada la salida a un pasillo de 3 m de ancho y después de pasar por él, han de girar totalmente.

Este equipo estuvo operativo durante 108 días y se estima que pasaron 1.339.931 pasajeros frente al detector. Este período se dividió en 5 sesiones: a) una primera sesión del ajuste

inicial del nivel de alarma del equipo, b) dos sesiones más donde se mantuvieron los valores de alarma de acuerdo con el ajuste inicial y, c) dos últimas sesiones, en que los niveles de alarma se fijaron próximos al límite de sensibilidad del equipo, para poder analizar las causas que pudieran producir las alarmas falsas (Tabla 2).

Durante el periodo que el equipo estuvo operativo también se determinó la tasa de dosis total y la tasa de dosis artificial para estudiar su influencia con las alarmas falsas. Entre los posibles factores que influyen en las alarmas falsas se estudiaron: como afectaba la disminución del nivel de tasa de dosis artificial en el número de alarmas falsas y la posible influencia de las fluctuaciones del fondo ambiental.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1.1. Medida del fondo

El valor medio del fondo medido con cada equipo ha sido: de $516 \pm 0,4$ cps en el equipo APM de Bicron, 5791 ± 15 cps en el equipo GR-606 de Exploranium y 1596 ± 45 cps en el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline. Estas diferencias son debidas, por una parte, al tamaño del detector de los diferentes equipos (a mayor volumen de un detector mayor es su fondo) y, por otra parte, a la eficiencia intrínseca de los detectores de NaI(Tl) frente a los detectores de PVT (3,5 veces superior en el NaI(Tl)). Además, la selección de un equipo fijo de pedestal, debe basarse en otros parámetros que se analizan en los siguientes apartados.

La tasa de dosis total en el Laboratorio con el equipo FHT-1372 fue de $95,4 \pm 0,8$ nSv/h y la tasa de dosis artificial de $0,5 \pm 0,4$ nSv/h (Figura 6). Estos valores se mantuvieron constantes a lo largo del día en los diferentes ensayos que se han realizado.

4.1.2. Niveles de alarma

El nivel de alarma fijado para 1,2 veces el fondo (expresado en número de sigmas) es distinto para cada equipo, ya que su fondo es diferente, es 4,5 para el APM de Bicron, 15 para el GR-606 de Exploranium y 7,7 para el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline.

| Número sesión | Días | Periodo | Pasajeros | Nivel de investigación (nSv/h) | |
|---------------|-----------------|--|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| | | | | Tasa de dosis total | Tasa de dosis artificial |
| 1 | 7 | 12:00 del 23 de abril - 0:00 del 30 de abril | 76.489 | 200 | --- |
| 2 | 21 | 12:00 del 14 de mayo - 11:00 del 4 de junio | 280.060 | 200 | --- |
| 3 | 10 | 12:00 del 4 de junio - 11:00 del 14 de junio | 130.739 | 200 | 20 |
| 4 | 28 | 12:00 del 14 de junio - 12:00 del 12 de julio | 339.338 | 120 | 12 |
| 5 | 42 | 12:00 del 12 de julio - 12:00 del 23 de agosto | 513.305 | 110 | 25 |
| Total | 108 días | | 1.339.931 pasajeros* | | |

TABLA 2. Ensayos realizados en el aeropuerto internacional de Barajas para la detección de muestras radiactivas.

* Los datos son de la base del tráfico aéreo y han sido proporcionados por AENA.

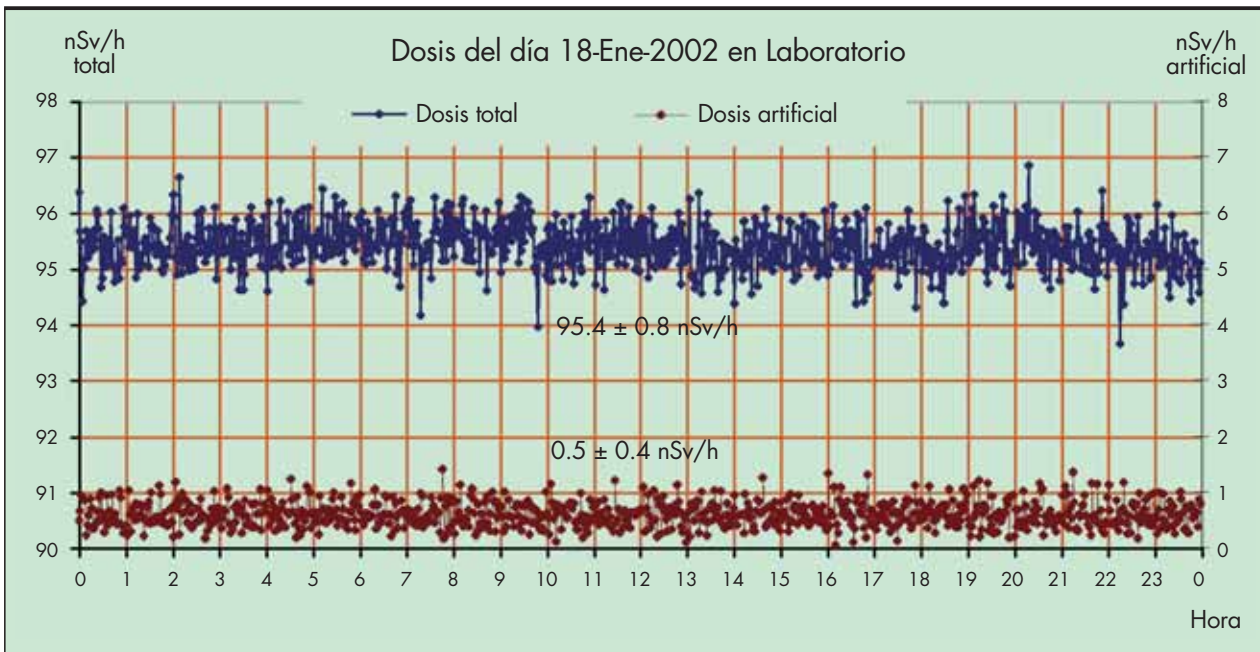


FIGURA 6. Tasa de dosis total y tasa de dosis artificial medida en el Laboratorio de Ingeniería Nuclear sin muestra radiactiva con el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline.

4.1.3. Verificación de alarmas

Se observa como en los tres equipos las detecciones son superiores a los niveles de alarma establecidos (Figuras 7, 8 y 9, respectivamente). Los tres equipos detectan todas las muestras radiactivas excepto el FHT-1372 que no detecta el americio-241, ya que el canal C1 discrimina las energías inferiores a 60 keV, y la energía de las emisiones gamma del americio-241 es inferior a este valor (59,5 keV).

4.1.4. Estudio de separación de radiactividad natural y artificial

En el caso del FHT-1372 se ha comprobado experimentalmente con fuentes radiactivas que cuando se pasaba una muestra de ra-

dionucleidos naturales (uranio natural, torio natural o radio-226) se activa la alarma de la tasa de dosis total y no se activa la alarma de tasa de dosis artificial, en cambio cuando se pasa una fuente artificial se activa la alarma de tasa de dosis total y tasa de dosis artificial (Figura 10). Esta observación nos permite informar cuando una fuente desconocida es de origen natural o artificial.

4.1.5. Estudio de los canales de energía para el FHT-1372

Pasando la muestra de cobalto-60 a 0,5 m el equipo mide una dosis total máxima de 222 nSv/h y una dosis artificial de 26,4 nSv/h. Pasando la muestra de cesio-137 a una distancia de 0,2 m su dosis total máxima es de 248 nSv/h y su dosis artificial es

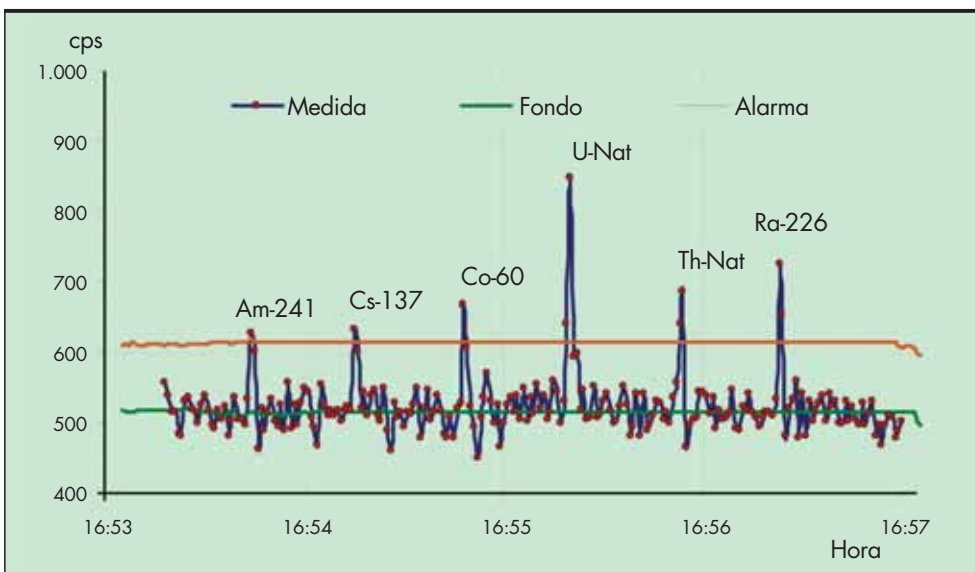


FIGURA 7. Verificación del ajuste de la alarma en el equipo APM de Bicorn realizado en el Laboratorio con distintas muestras radiactivas.

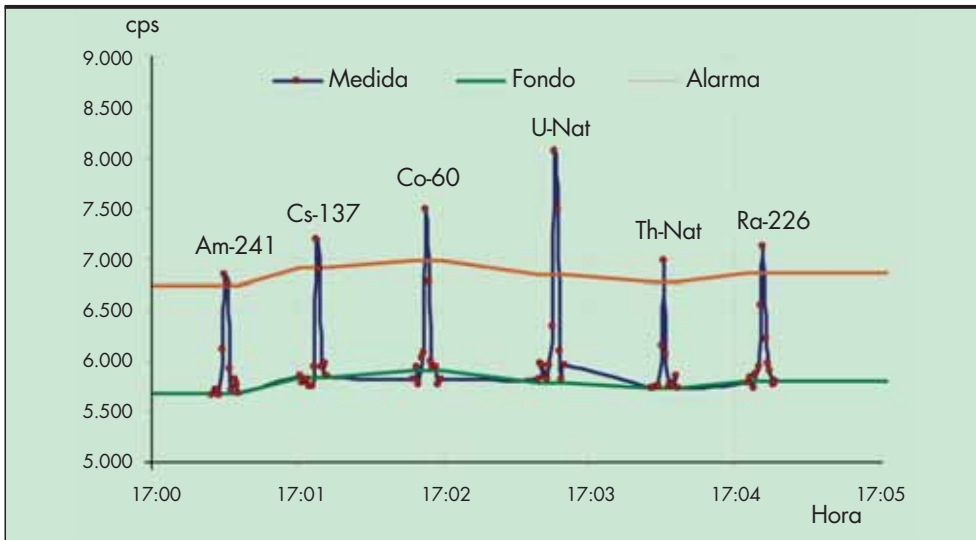


FIGURA 8. Verificación del ajuste de la alarma en el equipo GR-606 de Exploranium realizado en el Laboratorio con distintas muestras radiactivas.

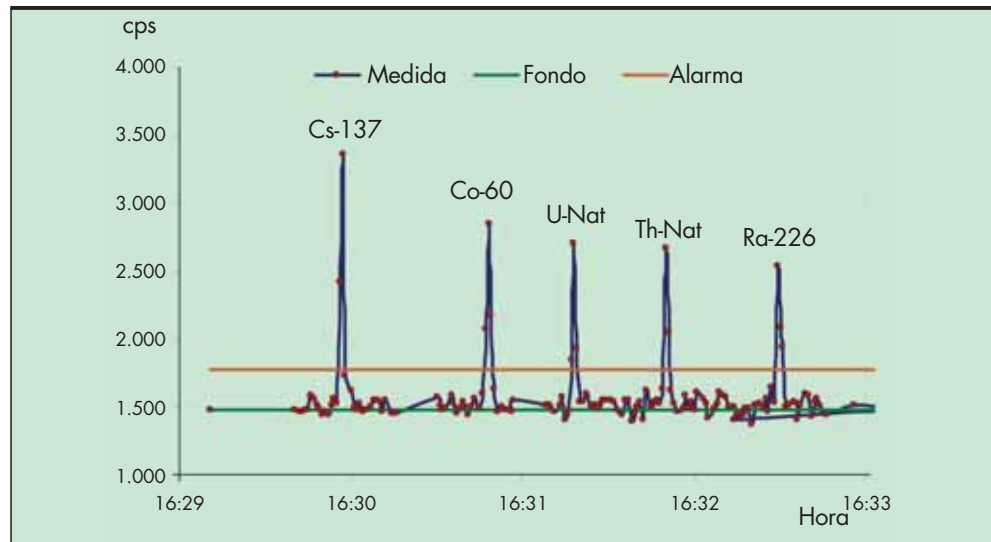


FIGURA 9. Verificación del ajuste de la alarma en el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline realizado en el Laboratorio con distintas muestras radiactivas.

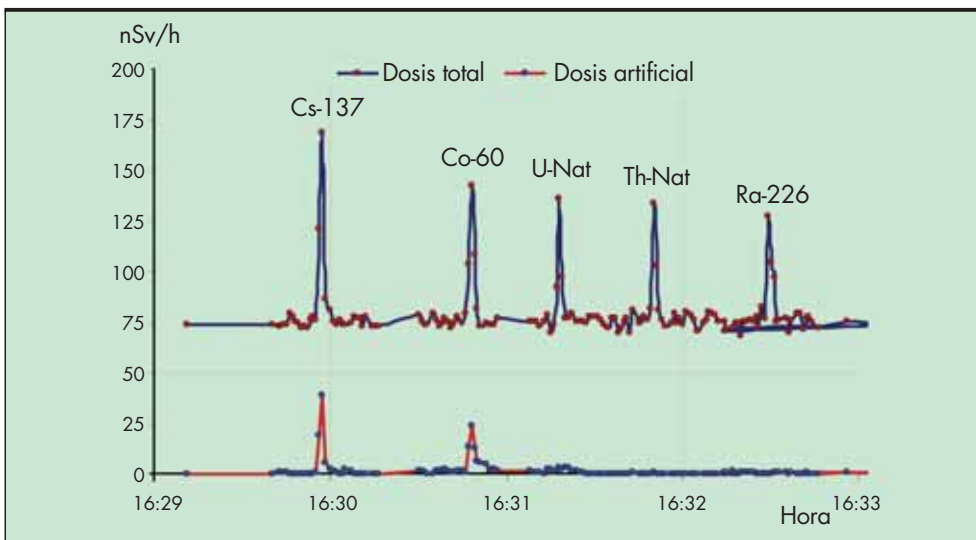


FIGURA 10. Medidas en el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline de la tasa de dosis total y de la tasa de dosis artificial con diferentes muestras radiactivas.

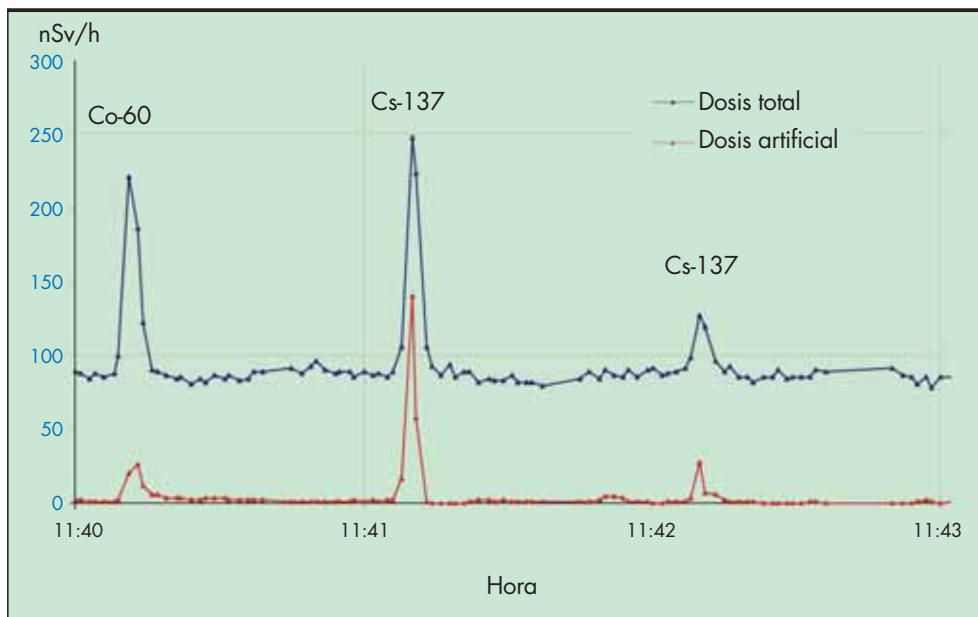


FIGURA 11. Verificación del cociente entre la tasa de dosis total y la suma de la tasas de dosis artificial más la tasa de dosis de fondo para radionucleidos de diferentes energías.

de 140 nSv/h, y a una distancia de 0,5 m su dosis total máxima es de 127 nSv/h y su dosis artificial es de 27,6 nSv/h (Figura 11). Analizando estos resultados se observa que (ver Ecuación 4) es próximo a 1 para radionucleidos con energía similar o inferior al cesio-137, y que dicho valor está alrededor de 1,8 cuando la energía del emisor es similar a la del cobalto-60.

4.1.6. Comparación de los equipos

La tabla 3 muestra los datos obtenidos con los tres equipos, al pasar las diferentes fuentes radiactivas a distintas distancias del detector. Estas distancias se han seleccionado para forzar la detección de las muestras radiactivas utilizadas, esto es, el valor I es superior a K. Se aprecia como los valores del incremento relativo del fondo (I) para el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline son superiores a los otros equipos para todas las muestras, lo que significa que este equipo es más sensible (con excepción del americio-241, como ya se comentó en el apartado de verificación de alarmas). Como consecuencia, se ha seleccionado este

equipo, y se ha instalado en la salida de la aduana de pasajeros del aeropuerto internacional de Barajas para comprobar su funcionamiento en situaciones reales. Por otra parte, este equipo presenta la ventaja adicional de que dispone de cuatro canales de medida que permiten distinguir fuentes de origen natural y artificial (González-González y otros, 2004).

4.2. ENSAYOS EN EL AEROPUERTO

4.2.1. Ajuste del nivel de alarma del equipo.

Las medidas iniciales realizadas en las tres primeras sesiones permitieron conocer la tasa de dosis del fondo, la respuesta del equipo y las variaciones más frecuentes. Estos resultados ayudaron a fijar los niveles de alarmas para no producir las alarmas falsas. Como criterio inicial para fijar la alarma del equipo se estableció en la primera sesión (del 23 al 30 de abril) un nivel de investigación de tasa de dosis total de 200 nSv/h, que era aproximadamente 2 veces la tasa de dosis ambiental. En la segunda

| Radionucleido | APM de Bicron | | | GR-606 de Exploranium | | | FHT-1372 de Thermo Eberline | | |
|---------------------|---------------|------------------------|------|-----------------------|------------------------|----|-----------------------------|------------------------|------|
| | F (cps) | C _{Máx} (cps) | I | F (cps) | C _{Máx} (cps) | I | F (cps) | C _{Máx} (cps) | I |
| Am-241 | 514 | 629 | 5,1 | 5684 | 6837 | 15 | 1474 | 1582 | 2,8 |
| Cs-137 | 516 | 634 | 5,2 | 5842 | 7183 | 18 | 1474 | 3359 | 49,1 |
| Co-60 | 516 | 666 | 6,6 | 5912 | 7492 | 21 | 1474 | 2847 | 36,8 |
| Uranio natural | 516 | 847 | 14,6 | 5782 | 8060 | 21 | 1474 | 2707 | 32,1 |
| Torio natural | 516 | 686 | 7,5 | 5722 | 6974 | 17 | 1474 | 2661 | 30,9 |
| Ra-226 | 516 | 724 | 9,2 | 5792 | 7118 | 17 | 1474 | 2536 | 27,7 |
| Nivel de alarma (K) | | | 4,5 | | | 15 | | | 7,7 |

TABLA 3. Comparación de la capacidad de detección de los tres equipos comerciales investigados en este trabajo.

sesión (del 14 de mayo al 4 de junio) se mantuvo el mismo nivel de alarma para obtener una mayor estadística de alarmas. En la tercera sesión (del 4 al 14 de junio) además de establecer el nivel de dosis total en 200 nSv/h, también se consideró situar el nivel de tasa de dosis artificial en 20 nSv/h, que representaba aproximadamente el 20% de la tasa de dosis ambiental.

En las dos últimas sesiones los niveles se fijaron próximos al límite de sensibilidad del equipo, para poder analizar las causas que pueden producir las falsas alarmas. Por ello, en la cuarta sesión (del 14 de junio al 12 de julio) se bajó el nivel de la tasa de dosis total en 120 nSv/h y el de tasa de dosis artificial en 12 nSv/h. Como se observó que el nivel de tasa de dosis artificial producía demasiadas alarmas falsas se realizó una quinta sesión (del 12 de julio al 23 de agosto) estableciendo el nivel de investigación para una tasa de dosis total de 110 nSv/h y una tasa de dosis artificial de 25 nSv/h. Estos valores finales están de acuerdo con los resultados obtenidos en el ITRAP de establecer el nivel de investigación en 1,2 veces el fondo natural (Duftschmid, 2002) y que, posteriormente, ha sido incorporado a la normativa internacional (ISO, 2004; IEC, 2006; ANSI, 2007). Conviene señalar que dicho nivel de investigación debe calcularse a partir del fondo radiactivo ambiental.

4.2.2. Análisis de detección

Cuando el equipo mide una tasa de dosis que supera el nivel de la alarma los resultados de las medidas se graban con más detalle. La detección de una muestra radiactiva se puede ver fácilmente en la representación gráfica de los resultados y se puede analizar en los valores numéricos (Figura 12). En la Tabla 4 se presentan las detecciones grabadas en el equipo durante los 108 días en los que el equipo estuvo operativo, pasando un total de 1.339.931 pasajeros delante del detector en las cinco sesiones de medida. Se observa que en todos los casos se producen alarmas por tasa de dosis total y por tasa de dosis artificial simultáneamente, lo que indica que todas las alarmas detectadas son de radionucleidos de origen artificial.

En general, la relación entre la tasa de dosis total y la suma de la tasa de dosis artificial más el fondo ambiental (Δ), se agrupa en valores próximos a 1, esto nos indica de forma orientativa que la energía del radionucleido artificial que provoca la alarma es igual o menor que la del cesio-137, como la detección del 10 de junio a las 9:54. Cuando su valor es superior a 1 la energía de las emisiones es superior al Cs-137, como la detección del día 10 de junio a las 14:06, cuya relación es 1.7 (Figura 13).

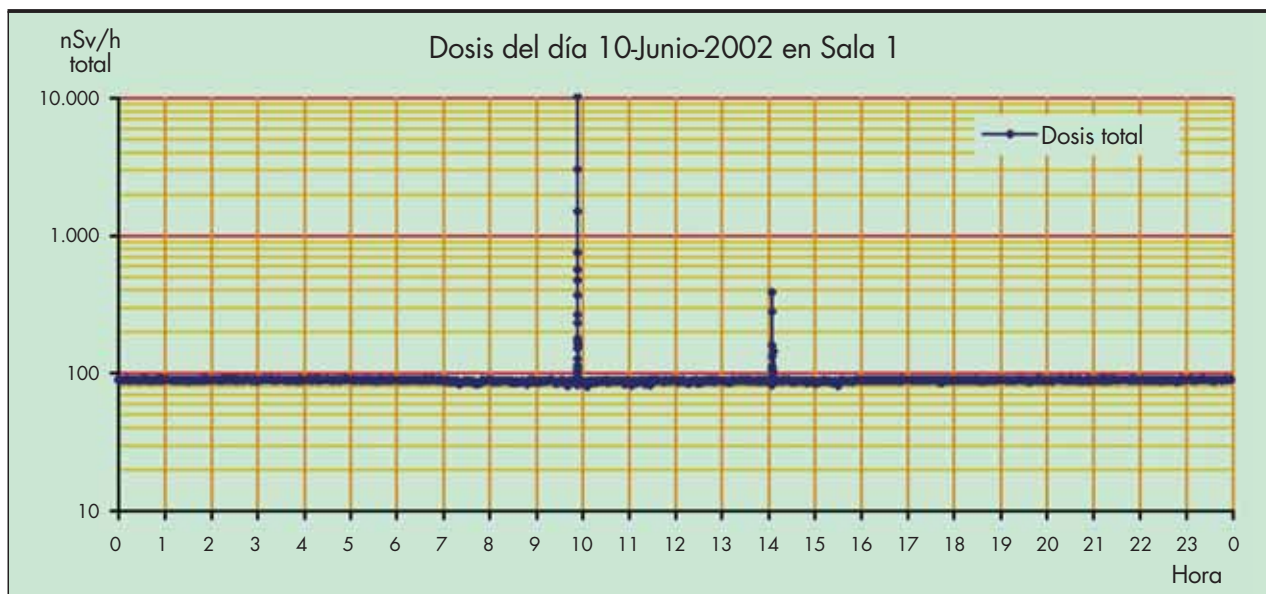


FIGURA 12. Medida del equipo cuando hay detección de muestras radiactivas.

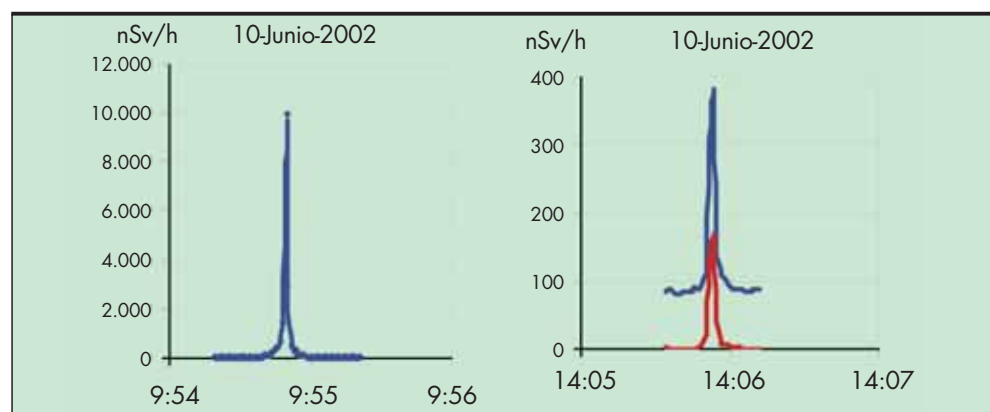


FIGURA 13. Medida detallada de las muestras radiactivas detectadas el 10 de junio.

| Fecha inicial | Fecha final | Número alarma | Fecha y hora detección | Dosis Total (nSv/h) | Dosis artificial (nSv/h) | Δ | Nivel de investigación |
|---------------|----------------|---------------|------------------------|---------------------|--------------------------|----------|---|
| 23/4/02 | 30/4/02 | 1 | 26/04/02 13:47 | 542 | 441 | 1,0 | Dosis total > 200 nSv/h |
| | | 2 | 27/04/02 07:37 | 1061 | 953 | 1,0 | |
| | | 3 | 27/04/02 09:55 | 202 | 113 | 1,0 | |
| 14/5/02 | 4/6/02 | 4 | 16/05/02 15:38 | 211 | 114 | 1,1 | Dosis total > 200 nSv/h |
| | | 5 | 18/05/02 08:44 | 285 | 172 | 1,2 | |
| | | 6 | 22/05/02 08:19 | 2935 | 1802 | 1,6 | |
| | | 7 | 22/05/02 08:47 | 202 | 83 | 1,4 | |
| | | 8 | 22/05/02 08:58 | 240 | 135 | 1,1 | |
| | | 9 | 22/05/02 12:04 | 356 | 188 | 1,4 | |
| | | 10 | 02/06/02 09:00 | 501 | 392 | 1,1 | |
| 4/6/02 | 14/6/02 | 11 | 06/06/02 15:13 | 143 | 47 | 1,2 | Dosis total >200 nSv/h artif>20 nSv/h |
| | | 12 | 10/06/02 09:54 | 9957 | 9711 | 1,0 | |
| | | 13 | 10/06/02 14:06 | 378 | 169 | 1,7 | |
| 14/6/02 | 12/7/02 | 14 | 15/06/02 10:15 | 102 | 15 | 1,1 | Dosis total >120 nSv/h o Dosis artificial >12 nSv/h |
| | | 15 | 17/06/02 14:22 | 237 | 140 | 1,1 | |
| | | 16 | 21/06/02 06:56 | 142 | 38 | 1,5 | |
| | | 17 | 22/06/02 09:56 | 127 | 41 | 1,0 | |
| | | 18 | 30/06/02 10:47 | 298 | 120 | 1,8 | |
| | | 19 | 30/06/02 11:02 | 201 | 109 | 1,1 | |
| | | 20 | 02/07/02 23:13 | 322 | 225 | 1,1 | |
| | | 21 | 03/07/02 00:15 | 311 | 201 | 1,1 | |
| | | 22 | 03/07/02 00:44 | 583 | 484 | 1,0 | |
| | | 23 | 03/07/02 10:13 | 193 | 99 | 1,1 | |
| | | 24 | 03/07/02 10:48 | 4511 | 2024 | 2,2 | |
| | | 25 | 03/07/02 11:02 | 104 | 23 | 0,9 | |
| | | 26 | 04/07/02 12:52 | 122 | 30 | 1,2 | |
| | | 27 | 04/07/02 13:42 | 146 | 48 | 1,3 | |
| | | 28 | 04/07/02 13:52 | 161 | 71 | 1,1 | |
| | | 29 | 06/07/02 10:41 | 437 | 345 | 1,0 | |
| | | 30 | 06/07/02 15:11 | 120 | 24 | 1,4 | |
| | | 31 | 10/07/02 22:08 | 123 | 55 | 0,7 | |
| 12/7/02 | 23/8/02 | 32 | 13/07/02 07:34 | 103 | 27 | 0,7 | Dosis total >110 nSv/h Dosis artificial >25 nSv/h |
| | | 33 | 13/07/02 10:26 | 250 | 141 | 1,2 | |
| | | 34 | 18/07/02 09:36 | 170 | 39 | 2,2 | |
| | | 35 | 23/07/02 21:20 | 172 | 85 | 1,0 | |
| | | 36 | 01/08/02 14:46 | 108 | 28 | 0,8 | |
| | | 37 | 02/08/02 08:27 | 113 | 22 | 1,3 | |
| | | 38 | 02/08/02 11:02 | 1461 | 1360 | 1,0 | |
| 39 | 06/08/02 08:13 | 118 | 38 | 0,9 | | | |

TABLA 4. Alarmas detectadas en el aeropuerto internacional de Barajas.

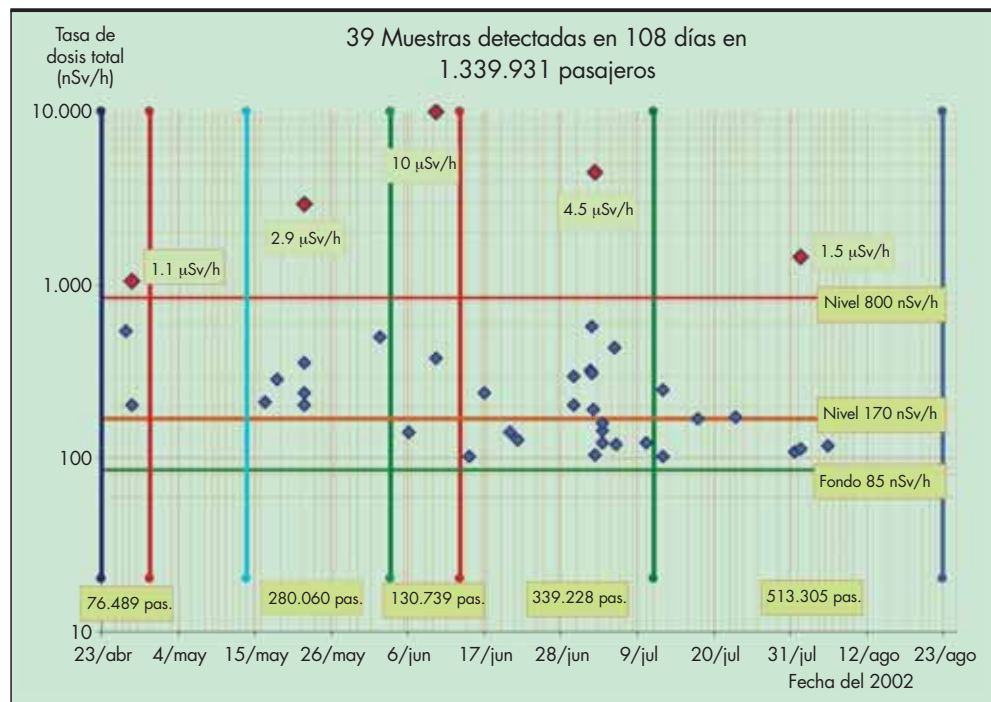


FIGURA 14. Detecciones durante un periodo de 108 días para 1.339.931 pasajeros.

De las 39 alarmas, 25 corresponden a un valor superior a dos veces la tasa de dosis del fondo (esto es, aproximadamente 170 nSv/h), cinco de ellas tienen un valor de diez veces la tasa de dosis del fondo (esto es, aproximadamente 850 nSv/h) y la que proporciona la mayor tasa de dosis detectada (esto es, 10 μSv/h), es 100 veces la tasa de dosis del fondo (Figura 14). Sin embargo, ninguna de estas muestras supera el nivel de 100 μSv/h a 1 m de distancia, que es el fijado por la Organización Internacional de la Energía Atómica (OIEA) como nivel de respuesta al nivel táctico, que entraña la participación de profesionales de protección radiológica, y es el límite establecido para el transporte lícito de material radiactivo (ISO, 2004).

4.2.3. Análisis de alarmas falsas

En la cuarta sesión de medida también se varió por software el nivel de investigación para la tasa de dosis artificial. Cuando el nivel de dosis artificial se reduce de 12 nSv/h a 5 nSv/h, se producen 668 falsas alarmas como se muestra en la Figura 15. En consecuencia, en la quinta sesión se optó en subir el nivel de investigación de la tasa de dosis artificial a 25 nSv/h para no tener demasiadas alarmas falsas.

La medida de la tasa de dosis ambiental en la sala, medida con el equipo FHT-1372 fue de $91,2 \pm 1,0$ nSv/h, y se reduce cuando aumenta la ventilación de la sala a un valor de $88,9 \pm 2,8$ nSv/h, con picos que descienden hasta 80 nSv/h. (Figura 16).

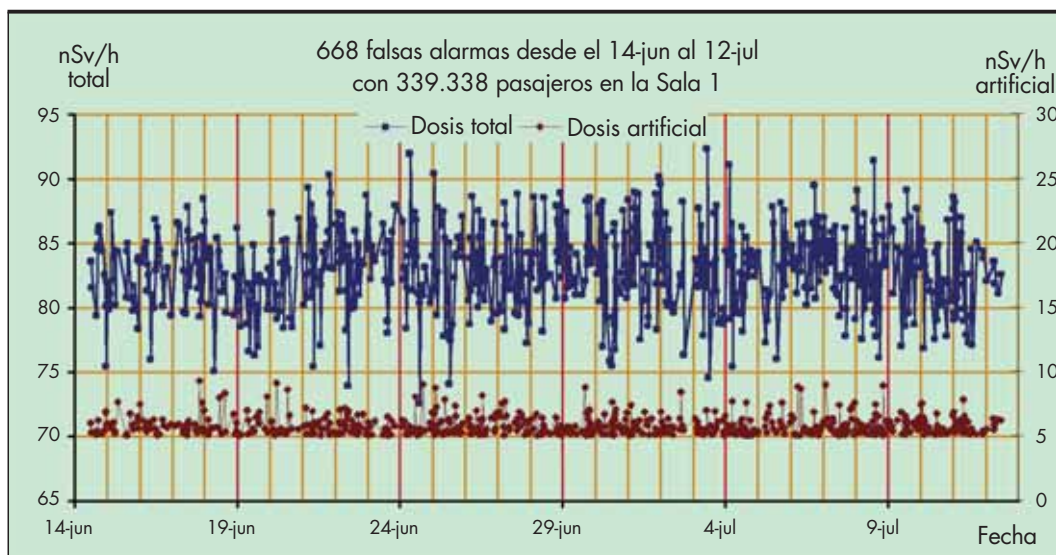


FIGURA 15. Alarmas falsas en la cuarta sesión (del 14 de junio al 12 de julio).

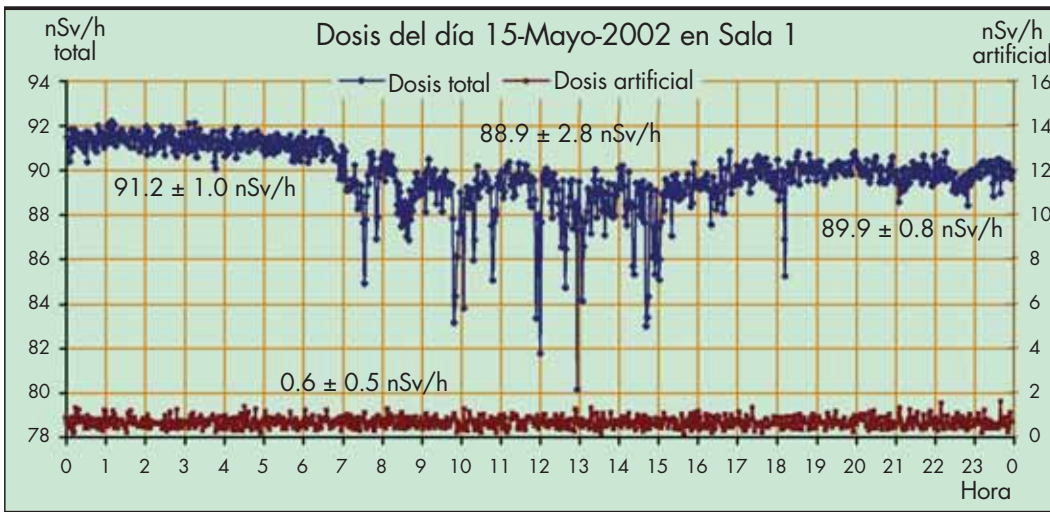


FIGURA 16. Tasa de dosis total y tasa de dosis artificial medida en el aeropuerto internacional de Barajas sin muestra radiactiva.

Esta reducción puede estar asociada al descenso del radón y sus descendientes, presentes en el aire de la sala, cuando se renueva el aire con apertura automática de la puerta de salida de las personas. Este hecho se comprobó correlacionando el número de pasajeros que atraviesan la sala con la reducción de dosis para diferentes días. En la Figura 17 se presenta, como ejemplo, los datos obtenidos para el 24 de abril de 2002, con un coeficiente de correlación, $\rho = 0,7$. Se encontró una anomalía entre las 12:00 y las 13:00, durante el periodo de tiempo con menor flujo de pasajeros, que puede atribuirse a las tareas de limpieza que realiza el servicio de mantenimiento produciéndose una mayor ventilación y renovación del aire en la sala y, en consecuencia, disminuye la tasa de dosis ambiental.

La tasa de dosis artificial en la sala del aeropuerto resultó ser de $0,6 \pm 0,5$ nSv/h. Este valor se ha mantenido constante a lo largo del tiempo y es igual al obtenido en el Laboratorio, esto es, $0,5 \pm 0,4$ nSv/h.

4.2.4. Comparación de los resultados con otros aeropuertos internacionales

Los resultados obtenidos en este trabajo se han comparado con otros estudios realizados en los aeropuertos internacionales de Viena en Austria (Duftschmid, 2002) y en el aeropuerto de She-

remetyevo en Rusia (Ulchlinov y Bojko, 2002). En ambos casos se utilizó un equipo fabricado en Rusia denominado Yantar 1U.

En el aeropuerto de Viena el equipo estuvo operativo durante 106 días y pasaron 260480 pasajeros produciendo 837 alarmas de emisores gamma. El 50% de las alarmas correspondían a detecciones cuyo incremento del fondo era inferior al 30%, y el valor máximo detectado fue 11 veces el del fondo. En comparación con el aeropuerto internacional de Barajas, donde el pórtico estuvo operativo 108 días, pasaron 1.339.931 pasajeros y hubo 39 alarmas, el dato de alarmas del aeropuerto de Viena no parece realista. Si consideramos los datos obtenidos en la cuarta sesión en el aeropuerto internacional estudiado cuando, por software, se redujo el nivel de alarma artificial de 12 nSv/h a 5nSv/h, y se produjeron 668 alarmas falsas para los 339.338 pasajeros, se reproduce el resultado de Viena. Pero, en ese caso, estos valores no son detecciones, sino inestabilidades comprobadas y registradas de la red, que se pueden superar añadiendo una fuente estabilizada de tensión. Estudios posteriores realizados en el mismo aeropuerto internacional de Viena han mostrado que en un periodo de un mes se han presentado 75 alarmas, de las cuales 71 eran de tratamiento médico, 2 de radionucleidos naturales y 2 no identificadas, ya que las personas no fueron inspeccionadas (Duftschmid, 2008).

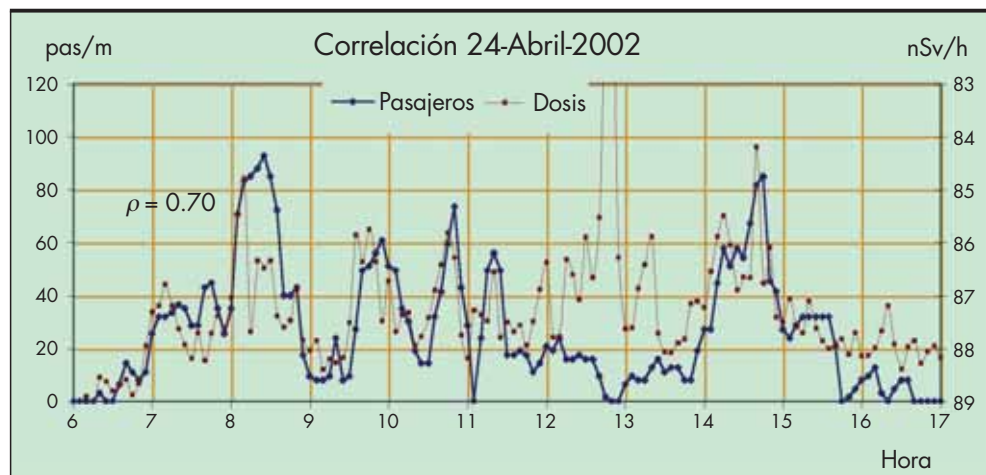


FIGURA 17. Correlación entre pasajeros (en unidades de pasajeros por minuto, eje de ordenadas izquierdo) y tasa de dosis total (eje de ordenadas derecho en unidades decrecientes) en la sala 1 de llegadas de la terminal T1.

Los únicos datos que se tienen del aeropuerto de Shermetyevo en Rusia es que en el año 1999 se tuvieron 61 incidentes y en el año 2000 se tuvieron 90 incidentes. Aunque no se tienen más datos ni tampoco sobre el tráfico de pasajeros, podemos comparar con el aeropuerto internacional de Barajas, extrapolando los 39 incidentes producidos en 108 días a todo el año, corresponderían a 132 alarmas, que es coherente con los resultados encontrados en Rusia.

5. CONCLUSIONES

En este estudio se han analizado tres equipos comerciales para el tráfico ilícito o el desplazamiento involuntario de muestras radiactivas. Los estudios realizados en el Laboratorio de Ingeniería Nuclear de la ETSI de Caminos, Canales y Puertos han mostrado que, aunque los tres equipos estudiados dan una buena respuesta activando la alarma al pasar frente a ellos muestras radiactivas tanto artificiales (cobalto-60, cesio-137 y americio-241) como naturales (uranio natural, torio natural y radio-226), se ha seleccionado el equipo FHT-1372 de Thermo Eberline por tener una respuesta más rápida y sensible. Además, la posibilidad de medir tasa de dosis total y tasa de dosis artificial nos proporciona información cuando la muestra que ha producido alarma es de origen natural o de origen artificial. Por otra parte, la relación entre la tasa de dosis total y la tasa de dosis artificial más la tasa de dosis ambiental proporciona información de la energía de las emisiones gamma de la muestra, que permite excluir algunas muestras radiactivas.

Se ha verificado que con este equipo se puede detectar el tráfico ilícito de material radiactivo sin interferir ni detener el movimiento normal de los pasajeros. El equipo ha detectado 39 muestras radiactivas, 5 de ellas con un valor de 10 veces el fondo ambiental de la sala y, una con 100 veces el fondo. Ninguna de estas muestras supera el nivel de 100 $\mu\text{Sv/h}$ a 1 m de distancia, que es el fijado por el OIEA como nivel de respuesta al nivel táctico. Las alarmas que se han producido tanto podrían clasificarse como alarmas reales, como alarmas inocentes, pues en estos casos no se paró el tráfico para investigar qué radionucleidos podrían provocar esa alarma.

Se ha observado que si el nivel de investigación de tasa de dosis artificial se sitúa muy bajo (alrededor de 5 nSv/h) se producen un número muy elevado de alarmas que corresponderían a alarmas falsas. Las medidas de la tasa de dosis ambiental en la salida de la aduana de pasajeros del aeropuerto internacional de Barajas con el equipo FHT-1372 mostraron que el fondo ambiental era de $91,2 \pm 1,0$ nSv/h, con mínimos que pueden llegar hasta 80 nSv/h.

Finalmente, se han comparado y discutido los resultados obtenidos en este trabajo con los de otros aeropuertos internacionales, siendo los datos coherentes y reproducibles.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por la Entidad Pública Empresarial de Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (AENA). Los autores de este trabajo agradecen al personal experto del AENA su colaboración con los expertos de la Universidad Politécnica de Madrid en la selección del emplazamiento inicial del equipo instalado y los condicionantes logísticos del aeropuerto.

7. BIBLIOGRAFÍA

ANSI (2007). American National Standard for Evaluation and Performance of Radiation Detection Portal Monitors for Use in Homeland Security, ANSI N42.35-2006.

Beck, P. (2000). ITRAP, Illicit Trafficking Radiation Detection Assessment Program, Final Report, OEFZS-G-0005, ARC Seibersdorf.

Beck, P., Schmitzer, Ch., Duftschmid, K.E., Arlt, R. (2002). ITRAP – International laboratory and field test site exercise for radiation detection instruments and monitoring systems at border crossings, in Measures to Prevent, Intercept and Respond to Illicit Uses of Nuclear Material and Radioactive Sources (Proc. Int. Conf. Stockholm, 2001), C&S Papers Series 12/P, IAEA, Vienna, 535-549.

Duftschmid, K.E. (2002). Over the border – the problems of uncontrolled radioactive materials crossing national borders, Journal of Radiological Protection, 22, 31-43.

Duftschmid, K.E. (2008). A single detector spectrometric portal monitoring concept solving the problems of 'innocent alarms', in Illicit Nuclear Trafficking: Collective Experience and the Way Forward (Proc. Int. Conf. Edinburgh, 2007), IAEA, Vienna, 587-598.

Ely, J. H., Kouzes, R. T., Geelhood, B. D., Schweppe, J. E., Warner, R. A. (2004). Discrimination of naturally occurring radioactive material in plastic scintillator material, IEEE Transactions on Nuclear Science, 51, 1672-1676.

González-González, J.A., Suárez-Navarro, M.J., García-Galludo, M., Goded-Velarde, J.M. (2003a). Medida de la tasa de dosis natural y artificial con un detector de plástico de gran volumen. XXIX Reunión Anual de la SNE. Zaragoza.

González-González, J.A., Suárez Navarro, M.J., García-Galludo, M., Goded-Velarde, J.M. (2003b). Evaluación de equipos comerciales para detectar el movimiento incontrolado de muestras radiactivas naturales y artificiales. XXIX Reunión Anual de la SNE. Zaragoza.

González-González, J.A., Suárez Navarro, M.J., García-Galludo, M., Goded Velarde, J.M. (2004). Evaluación de equipos para detectar el tráfico incontrolado de muestras radiactivas. XXX Reunión Anual de la SNE. Alicante.

IEC (2006). Radiation protection instrumentation – Installed radiation monitors for the detection of radioactive and special nuclear materials at national borders, CEI/IEC 62244:2006.

ISO (2004). Monitoring for inadvertent movement and illicit trafficking of radioactive material, ISO 22188:2004, Geneva.

Knoll, G.F. (2000). Radiation Detection Measurements, 3ª edición, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Kouzes, R. T., Ely, J. H., Geelhood, B. D., Hansen, R. R., Lepel, E. A., Schweppe, J. E., Siciliano, L., Stron, D. J., Warner, R. A. (2003). Naturally occurring radioactive materials and medical isotopes at border crossings. In: Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE, 1448-1452.

Lubenu, J.O., Yusko, J.G. (1988). Radioactive materials in recycled metals – an update, Health Physics, 74, 293-299.

Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) (2004). Detección de materiales radiactivos en las fronteras, IAEA-TECDOC-1312/S, Viena.

Siciliano, E.R., Ely, J.H., Kouzes, R.T., Milbrath, B.D., Schweppe, J.E., Stromswold, D.C. (2005). Comparison of PVT and NaI(Tl) scintillators for vehicle portal monitor applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 550, 647-674.

Ukhlinov, L.M., Bojko, V.I. (2002). Organization of customs control of fissionable and other radioactive materials, in Measures to Prevent, Intercept and Respond to Illicit Uses of Nuclear Material and Radioactive Sources (Proc. Int. Conf. Stockholm, 2001), C&S Papers Series 12/P, IAEA, Vienna, 457-460.