

Estudio de un sistema de detección tipo pórtico para su aplicación en la industria del metal

L. PUJOL (*), S. LARA-CALLEJA (**), M. J. SUÁREZ-NAVARRO (***) y J. A. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ (***)

RESUMEN La industria del hierro y del acero es uno de los sectores más importantes en España para su desarrollo económico. El reciclaje y la reutilización de materiales metálicos así como, la importación de chatarras son muy significativas. El amplio número de informes acerca de dispersiones y fundidos accidentales de materiales con contenido radiactivo en recuperadoras de metales metálicos, instalaciones siderúrgicas y fundiciones, pone de manifiesto, la necesidad de un control radiológico riguroso y específico del sector.

El control de estos materiales con contenido radiactivo se puede llevar a cabo con detectores de radiación tipo pórtico instalados en las entradas de las recuperadoras de metales, instalaciones siderúrgicas y fundiciones. La detección de este material presenta características particulares como, por ejemplo, la medida continua del fondo ambiental o la minimización de detecciones no deseadas, tales como, falsas detecciones y detecciones inocentes.

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en el estudio de un detector de radiación de tipo pórtico (en concreto, el FHT-1388-T Thermo-Eberline), que suele estar instalado en estas industrias. En este trabajo se estudian sus características y parámetros de trabajo con el fin de optimizarlos y recomendar una serie de ensayos rápidos y sencillos para su utilización en la industria del metal.

STUDY OF A RADIATION PORTAL MONITOR AND ITS APPLICATION TO METAL RECYCLING INDUSTRY

ABSTRACT *The industry of the iron and the steel is one of the most important sectors in Spain for its economic development. The recycling of metallic materials as well as the import of metallic scrap is very significant. Several reports on accidental dispersion or smelting of radioactive sources in metal recycling industries confirm the possibility that radioactive material might be mixed with scrap. In consequence, this type of accident shows the necessity of a rigorous and specific radiation control of the sector.*

The control of these materials with radioactive content can be carried out with radiation portal monitors installed at the entrance of these industries. The detection of radioactive material presents special features as the continuous background acquisition or the minimisation of the relatively large number of innocent / nuisance detections.

In the present work, we study a radiation portal monitor, the FHT-1388-T Thermo-Eberline. This is one of the usual radiation portal systems installed at the entrance of the metal recycling industry. We study the characteristics and parameters of this portal monitor to optimise its use. Furthermore, we propose some rapid tests for radiation portal systems in metal recycling industry.

Palabras clave: Detectores tipo pórtico, Materiales reciclados, Radiactividad, Industria siderúrgica.

Keywords: Detectors type portico, Recycled materials, Radioactivity, Metallurgical industry.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, a pesar de que el uso de materiales radiactivos es sometido a estrictos controles, se han detectado diversos materiales con contenido radiactivo en las

recuperadoras de metales e instalaciones siderúrgicas. El amplio número de informes relacionados con dispersiones y fundidos accidentales (Lubenau y Yusko 1995, 1998; O'Grady y col. 1996; Rodríguez y col. 2001; CSN, 2003a; CSN, 2007) pone de manifiesto la necesidad de un control aún más riguroso y específico para este sector. Por este motivo, se han desarrollado una serie de iniciativas a nivel nacional e internacional, para controlar la presencia de material radiactivo en la chatarra (Ortiz, 2008).

En España, la industria del hierro y del acero es uno de los sectores más importantes desde un punto de vista económico y de desarrollo del país, y la importación de chatarras como materias primas es muy significativa. El reciclaje y la reutilización de materiales y equipamiento se ha incremen-

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

(**) Becaria del programa de Formación de personal investigador del CEDEX. Licenciada en Química. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CEDEX). Ministerio de Fomento.

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

tado en los últimos años, fundamentalmente por dos razones: oportunidades económicas y conciencia de conservación del medio ambiente, por lo que se ha visto necesario establecer un programa de control radiológico. Además, después del incidente de fusión de una fuente de cesio-137 en una acería de Los Barrios (Cádiz) en 1998, las partes interesadas (Administración Pública, Organismos Reguladores, Industrias del Metal y Agentes Sociales) tomaron conciencia de la creciente preocupación social y de la importancia para la economía y para el medio ambiente de este tipo de incidentes.

Por otra parte, cuando se produce una alarma en un detector de radiación, es necesario determinar si es una detección verdadera o no. Si se confirma la presencia de material radiactivo, hay que localizarlo y eliminarlo según los cauces legales. Inicialmente cuando se producía una detección, se provocaba una situación de inquietud al no estar bien definida la forma de actuar, además del perjuicio económico que suponía una falsa detección (Ortiz, 2008).

Para clarificar esta situación se preparó en 1999 un Protocolo que establece un sistema nacional para prevenir los riesgos derivados de la presencia de material radiactivo. Este sistema español, se puede considerar pionero y avanzado dentro de la Unión Europea. (Ministerio de Industria y Energía, 1999; Dirección General de la Energía, 2000).

Aunque a nivel internacional no existe una legislación específica para el control de la radiactividad en materiales metálicos, en el año 2002, se publicó una Recomendación de la Unión Europea sobre la vigilancia y control de los materiales radiactivos en el reciclaje del metal (UE, 2002). Excepcionalmente, hay que señalar que en el caso de Holanda sí que existe una reglamentación nacional en materia de pórticos, donde se especifica tanto los requisitos técnicos, como las características de la producción y del tratamiento de las empresas del metal que tengan instalados pórticos (Blaauboer y col., 2004).

Las particularidades que presenta la detección de material radiactivo en la chatarra, exigen la instalación de equipos específicos y su utilización de forma sistemática y adecuada. Para la vigilancia radiológica de la chatarra, pueden utilizarse equipos fijos o portátiles (CSN, 2003b).

Los sistemas de detección fijos que se instalan, son detectores tipo pórtico de centelleo plástico de gran tamaño y que se utilizan para la vigilancia radiológica de grandes volúmenes de material. Los detectores tipo pórtico ubicados en las entradas de las instalaciones, controlan el paso de entrada o salida de la chatarra, para comprobar si pudiese estar conta-

minada pretendiendo, principalmente, que el material radiactivo no llegue a los procesos de tratamiento de la chatarra.

El sistema de detección más recomendado consiste en varios paneles y una unidad de control. Cada uno de estos paneles contendrá uno o varios detectores, siendo la configuración básica, dos paneles situados en los laterales del camino de entrada del vehículo. Cada detector debe estar blindado en la superficie no sensible, para proporcionar la reducción del fondo necesaria, además de mantener la sensibilidad suficiente para detectar pequeños incrementos de la radiación de las muestras en cortos periodos de tiempo, ser resistentes a las condiciones ambientales y permitir el control del paso y de la velocidad del vehículo.

Los equipos o detectores portátiles, se utilizan para identificar el origen de la señal obtenida por los pórticos. Deben ser ergonómicos, de fácil manejo y disponer de alarmas acústicas, así como permitir la medida de los niveles de tasa de dosis o contaminación superficial.

El objetivo de este trabajo de investigación, es el estudio de un sistema de detección tipo pórtico, concretamente, el modelo FHT-1388-T de la empresa *Thermo-Eberline*, para recomendar unos ensayos rápidos y sencillos, necesarios para su correcta utilización en acerías y plantas de reciclado.

2. EXPERIMENTAL

2.1. DESCRIPCIÓN DEL DETECTOR TIPO PÓRTICO FHT-1388-T

El equipo Thermo Eberline FHT-1388-T (figura 1), está compuesto por dos paneles rectangulares de policloruro de vinilo (PVC), de 1920 x 850 x 140 mm y un peso de 236 kg. En su interior hay un detector de centelleo plástico de poliviniltolueno (PVT) de 1000 x 500 x 50 mm, con 25 l y una superficie de 0,50 m². Cada detector tiene un tubo fotomultiplicador, su propia electrónica, y un microprocesador accesible por una ventana del panel. La alimentación y el control son externos. Rodeando el detector excepto en la zona frontal, hay un aislante térmico. En la parte posterior interna de cada panel se coloca un blindaje de plomo de 10 mm de espesor para reducir la tasa de fondo.

Este pórtico emplea para cada detector un circuito electrónico FHT-S41 S4, con un microprocesador que controla:

- Cuatro discriminadores digitales fijos de los impulsos de las detecciones.
- Cuatro contadores independientes para el recuento de las detecciones que superen cada uno de los discriminadores, durante intervalos de tiempo de 333 ms.

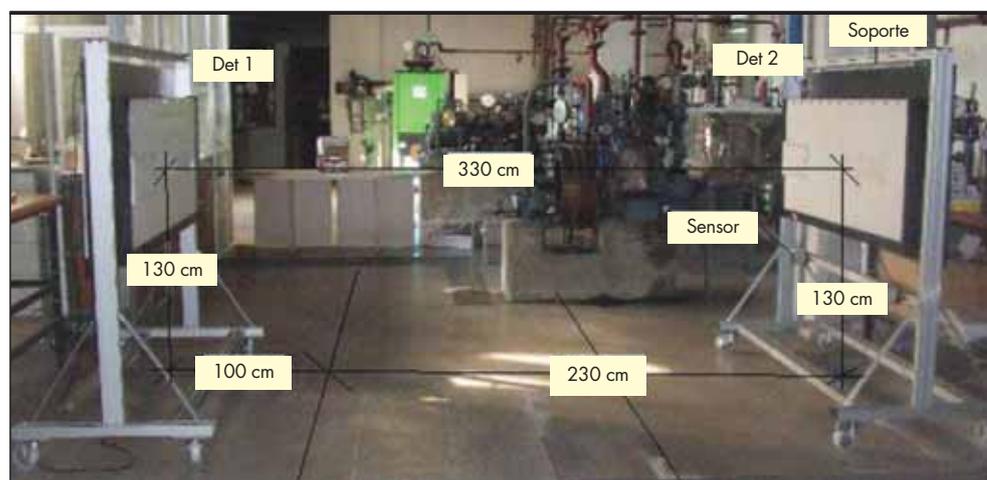


FIGURA 1. Disposición de los pórticos FHT-1388-T de Thermo-Eberline en el laboratorio de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la UPM.

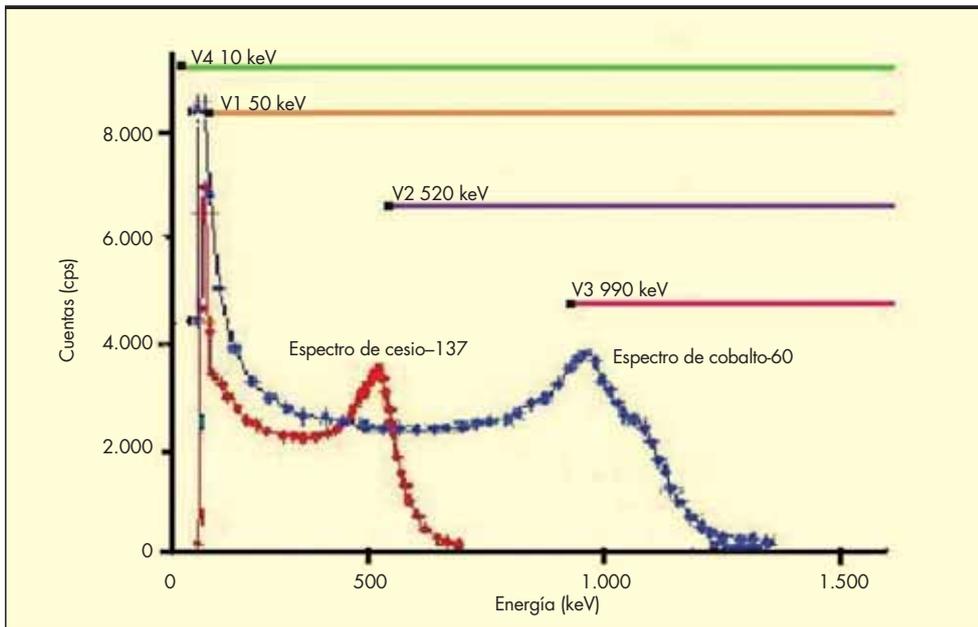


FIGURA 2. Situación de los discriminadores y espectros del cesio-137 y del cobalto-60.

- Un sensor de temperatura para medir su valor en el circuito.
- Un generador digital de alta tensión para cada fotomultiplicador de hasta 1350 V.
- Los controles lógicos de entrada y salida para el ordenador personal.

El ordenador personal tiene varios módulos electrónicos adicionales que permiten la gestión y el control de los datos que generan los circuitos electrónicos de los detectores, de los sensores de paso del vehículo y de las salidas asociadas a las alarmas.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS VENTANAS DE LOS DISCRIMINADORES

Los cuatro discriminadores fijados por el fabricante (figura 2) se dividen del siguiente modo:

- Umbral de la ventana 1, V1, elimina ruido por debajo de 50 keV (120 mV) optimizando las emisiones gamma.
- Umbral de la ventana 2, V2, separa el cesio-137 del cobalto-60, ajustando el potencial de modo que el discriminador del cesio-137 esté en 520 keV (1320 mV).
- Umbral de la ventana 3, V3, se ajusta por encima del discriminador del cobalto-60, en 990 keV (2500 mV), para energías superiores al cobalto-60.
- Umbral de la ventana 4, V4, para aislar el ruido electrónico o medir bajas energías como los rayos X o el americio-241, se sitúa en 10 keV (25 mV) hasta el final.

2.3. SOFTWARE DEL EQUIPO

El software del equipo Thermo Eberline FHT-1388-T, se maneja con dos programas. El primero, TSCRAP, funciona a modo de usuario. Recoge los datos de tasa de fondo, alarmas de las ventanas y cuentas totales. Se engloban las operaciones necesarias para manejar el equipo de un modo sencillo y controlar los parámetros internos del mismo. El programa TESTSON.EXE sirve para configurar los parámetros internos del

equipo, fundamentalmente los relacionados con los tubos fotomultiplicadores. Los datos de la configuración inicial determinados por el fabricante, están almacenados en el fichero TESTSON.INI.

2.4. MUESTRAS DE REFERENCIA

Los ensayos se han realizado utilizando, muestras de cesio-137 encapsuladas. Las características de las muestras de referencia utilizadas se presentan en la tabla 1.

3. ENSAYOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO

Se realizaron los siguientes ensayos:

- *Estudios del fondo de los detectores.* Se realizaron distintos tipos de ensayos: 1) influencia del blindaje en el fondo, 2) medida del fondo en las ventanas de los detectores y 3) determinación del fondo en función del potencial. El fondo se determina en cuentas por segundo (en adelante, cps).
- *Determinación de la curva característica y del potencial de trabajo.* Para la determinación de la curva característica se utilizó la muestra de referencia de cesio-137 de 37 kBq. El potencial de trabajo se calculó mediante diferentes métodos: 1) mediante la curva característica (método experimental), 2) mediante un método automático que proporciona el software del equipo, y 3) mediante el cálculo de la figura de mérito.

Muestra de referencia	Actividad de referencia (kBq)	Fecha referencia	Periodo semidesintegración (años)
cesio-137	37	01/01/2003	30,2
cesio-137	370	01/04/2005	30,2

TABLA 1. Características de las muestras de referencia utilizadas en este trabajo.

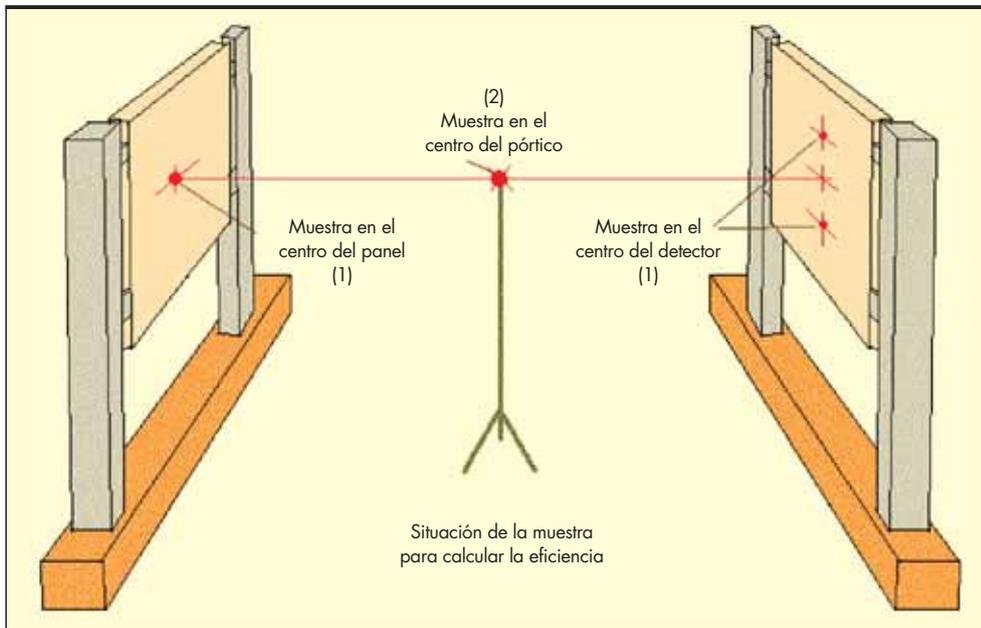


FIGURA 3. Ensayos estáticos de los detectores: 1) determinación de la eficiencia en la superficie del panel o detector, 2) determinación de la eficiencia en el centro del pórtico.

- *Ensayos estáticos de los detectores* (figura 3). Los ensayos que se realizaron fueron los siguientes (ANSI, 2006a): 1) determinación de la eficiencia detector en varios puntos de la superficie del panel o detector (figura 4) utilizando las dos muestras de referencia de cesio-137 y 2) determinación de la eficiencia en el centro del pórtico utilizando la muestra de referencia de cesio-137 de 370 kBq.
- *Ensayos dinámicos*. Se calcula la respuesta del pórtico cuando se pasa la muestra de referencia de cesio-137 de 370 kBq entre los paneles. Los ensayos se realizan, siguiendo la trayectoria central en la zona sensible de los detectores (IAEA, 2006). Este tipo de ensayos permite obtener resultados cuantitativos de la capacidad de detección en situaciones similares a las reales en las que un camión con chatarra pasa a una velocidad de entre 5-8 km/h entre los pórticos. Se determina la eficiencia dinámica del pórtico y el límite de detección dinámico tanto en nSv/h como en kBq.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ESTUDIOS DEL FONDO EN LOS DETECTORES

El fondo de los detectores disminuye con el blindaje en un 21 % (de 5059 ± 17 cps a 4004 ± 15 cps) para el detector 1, y en un 12 % (de 5315 ± 35 cps a 4685 ± 21 cps), en el caso del detector 2. En consecuencia, todos los ensayos que se realizaron fueron con el blindaje instalado en el equipo.

En la tabla 2 se presentan las tasas de fondo en las ventanas de los detectores. Hay que destacar los siguientes aspectos:

- El número de cuentas correspondientes a la ventana 1 (V1), a partir de 50 keV, proporciona el valor del fondo ya que corresponde a la medida de todo el espectro energético exceptuando la zona de más baja energía, donde se localiza el ruido electrónico del equipo que queda de este modo eliminado.
- El número de tasa de recuento más elevado, le corresponde a la ventana 4 (V4), ya que esa ventana mide todo el espectro electrónico desde 10 keV.

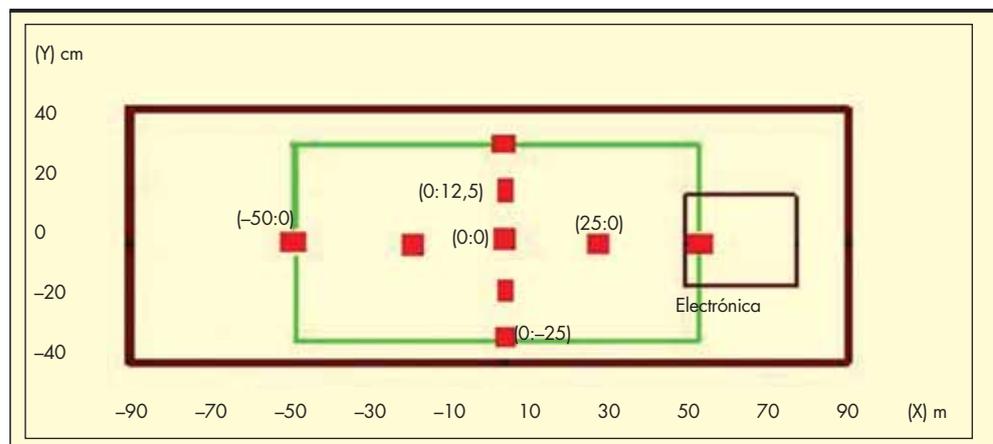


FIGURA 4. Puntos de medida en el ensayo estático de la determinación de la eficiencia en la superficie del panel o detector.

	Tasa de fondo (cps)				relación		
	V1	V2	V3	V4	V1/V2	V2/V3	V4/V1
Detector 1	3962 ± 54	564 ± 24	133 ± 10	6567 ± 73	7,0 ± 0,3	4,3 ± 0,3	1,66 ± 0,02
Detector 2	4576 ± 28	682 ± 28	162 ± 13	8054 ± 86	6,7 ± 0,3	4,2 ± 0,3	1,76 ± 0,02

TABLA 2. Tasa de fondos para cada ventana para los dos detectores.

- Existen unas relaciones entre las ventanas del detector con unos valores límites, que permiten o no determinar la presencia o no de material radiactivo. Estas relaciones son:
 - V1/V2, permite la detección de cesio-137.
 - V2/V3, detecciones de cobalto-60.
 - V4/V1, emisiones de baja energía y proporción de ruido electrónico.

En la representación del fondo en función del potencial se observa que la tasa de fondo se incrementa rápidamente al aumentar el potencial, con lo que es necesario utilizar el potencial de trabajo adecuado para no tener una tasa de fondo demasiado elevada que afecte a los resultados de las medidas (figura 5).

4.2. DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA Y DEL POTENCIAL DE TRABAJO

En la figura 6 se representa la curva característica para el detector 2 (la del detector 1 tiene el mismo comportamiento) realizada con la muestra de referencia de cesio-137 de 37 kBq, y donde ya se ha restado el fondo (tasa de recuento neta). Se observa que existe un potencial umbral a partir del cual empieza el recuento. La curva característica está formada por dos rectas de distinta pendiente que se cortan aproximadamente en un punto que correspondería al potencial de medida del equipo. El valor de este punto de corte es de 886 ± 159 V para el detector 1 y de 890 ± 144 V para el detector 2. En consecuencia, se han introducido también los resultados de este método para el cálculo del potencial de trabajo, a este método le hemos denominado método experimental.

En el método automático se determina mediante el programa TESTSON, los valores obtenidos han sido de 910 V para el detector 1 y 930 V para el detector 2, respectivamente.

El tercer método utilizado para la determinación del potencial de trabajo, ha sido mediante el cálculo de la figura de mérito (FM):

$$FM = \frac{(C_T - \bar{F})^2}{\bar{F}} = \frac{C^2}{\bar{F}} \quad (1)$$

donde:

C_T es la tasa de recuento total de la muestra de cesio-137, en cps.

C es la tasa de recuento neta de la muestra de cesio-137, en cps.

\bar{F} es la tasa de fondo del detector, en cps.

En la figura 7 se presenta la figura de mérito en función del potencial. Se observa que existe una zona en la cual la figura de mérito prácticamente no varía al aumentar el potencial, a esta zona se la denomina *plateau*. El principio de esa zona es la que se considera adecuada como potencial de trabajo. Los potenciales obtenidos son de 900 V para el detector 1 y, de 925 V para el detector 2.

Los potenciales que se obtienen mediante los tres métodos no varían significativamente respecto a los potenciales del fabricante. Esto se puede ver al calcular el valor medio de los tres potenciales (método experimental, automático y mediante la figura de mérito) para cada detector, que da un valor similar al del fabricante (tabla 3). Por lo que se decidió no variar el potencial para los ensayos siguientes.

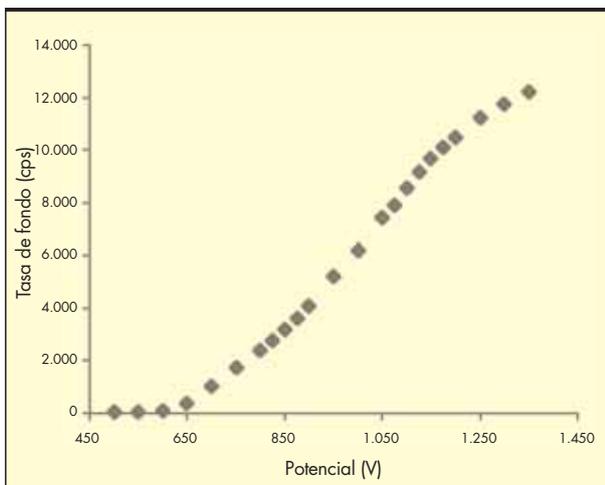


FIGURA 5. Curva característica de la tasa de fondo del detector 1.

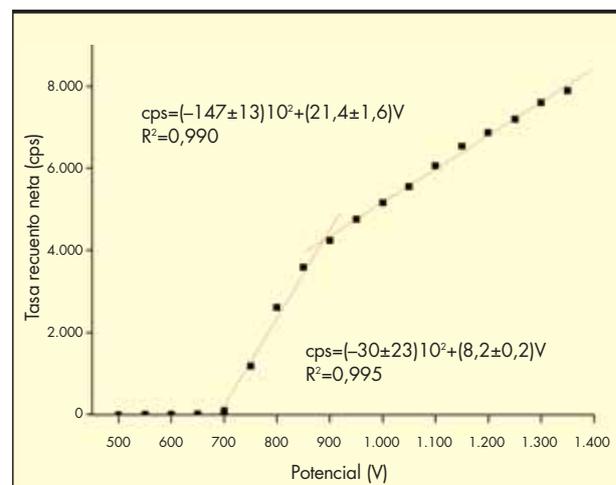


FIGURA 6. Ajuste de las curvas del detector 2.

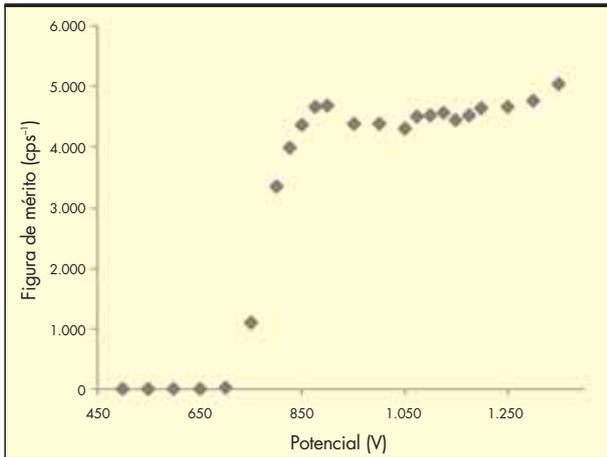


FIGURA 7. Figura de mérito en función del potencial para el detector 1.

Potencial de Trabajo	Detector 1 (V)	Detector 2 (V)
Experimental	886	890
Automático	910	930
Manual	900	925
Valor medio	899	915
Fabricante	892	920

TABLA 3. Potencial de trabajo para los distintos métodos utilizados para su determinación.

4.3. ENSAYOS ESTÁTICOS DE LOS DETECTORES

Las tablas 4 y 5 muestran los resultados de la eficiencia de los dos detectores para las muestras de cesio-137 de actividad 37,0 kBq y 370 kBq, respectivamente. Se observa que la eficiencia puede variar entre un 5 y un 15 % dependiendo de la posición de la muestra de referencia en la superficie del detector.

(X,Y)	Detector 1		Detector 2	
	E(%)	u(E)	E(%)	u(E)
(0:0)	13,68	0,75	14,72	0,81
(25:0)	12,92	0,71	13,72	0,76
(50:0)	7,23	0,40	8,32	0,46
(-25:0)	14,45	0,79	14,94	0,82
(-50:0)	6,45	0,36	5,61	0,31
(0:12,5)	13,05	0,72	13,62	0,75
(0:25)	8,07	0,45	9,00	0,50
(0:-12,5)	12,96	0,71	13,74	0,76
(0:-25)	8,12	0,45	7,95	0,44

TABLA 4. Resultados de eficiencia de la muestra de referencia de cesio-137 de 37 kBq.

(X,Y)	Detector 1		Detector 2	
	E(%)	u(E)	E(%)	u(E)
(0:0)	12,80	0,67	13,09	0,68
(25:0)	11,85	0,62	12,17	0,63
(50:0)	6,73	0,35	7,06	0,37
(-25:0)	12,89	0,67	13,25	0,70
(-50:0)	5,66	0,29	5,20	0,27
(0:12,5)	11,98	0,62	12,12	0,63
(0:25)	7,45	0,40	7,45	0,39
(0:-12,5)	11,57	0,60	12,38	0,64
(0:-25)	7,16	0,37	7,90	0,41

TABLA 5. Resultados de eficiencia de la muestra de referencia de cesio-137 de 370 kBq.

Los resultados conducen a las siguientes conclusiones:

- La máxima eficiencia de los detectores está en la zona central y la eficiencia de los detectores disminuye al alejarse de la zona central.
- La eficiencia con la muestra de 370 kBq es menor que la obtenida con 37 kBq, esto es debido a que la muestra de actividad 370 kBq en contacto con la superficie del panel produce la saturación del detector recogiendo menos emisiones y disminuyendo la eficiencia (efecto del tiempo muerto en los detectores) (Knoll, 2000).
- En la figura 8 se ha representado la eficiencia en la superficie del detector a lo largo del eje Y, para uno de los detectores y para una de las muestras de referencia. Los datos experimentales se han ajustado a una función polinómica de segundo grado. La representación, tanto para el eje X como el eje Y, para cada uno de los detectores y para las dos muestras de referencia de cesio-137, presenta unos valores del coeficiente de determinación que varían entre 0,960 y 0,997.

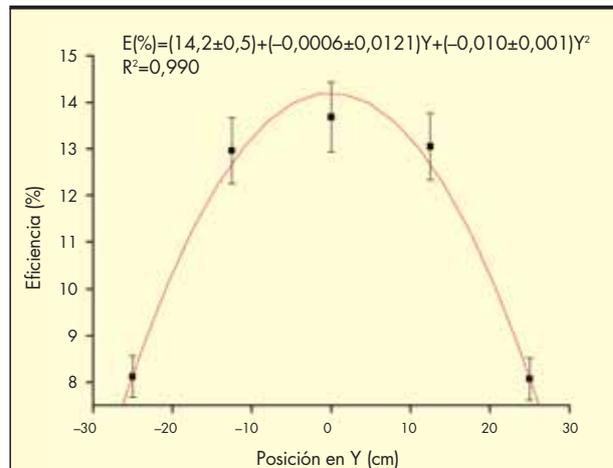


FIGURA 8. Variación de la eficiencia a lo largo del eje Y con la muestra de cesio-137 de 37 kBq para el detector 1.

	Tasa de recuento total (CT), en cps	Tasa de fondo (F), en cps	CT-F en cps	Eficiencia (%)
Detector 1	5123±81	4010 ± 86	1113±118	0,31±0,015
Detector 2	5723±75	4662 ± 110	1061±133	0,30±0,015

TABLA 6. Eficiencia estática en el centro del pórtico con muestra de referencia de cesio-137. La incertidumbre esta expresada como k = 1.

TABLA 7. Eficiencia dinámica en el centro del pórtico con muestra de referencia de cesio-137.

	Tasa de recuento total (CT), en cps	Tasa de fondo (F), en cps	CT-F en cps	Eficiencia (%)
Detector 1	4328±136	4019±71	308±154	0,09±0,005
Detector 2	5089±167	4722±82	367±186	0,10±0,005

La tabla 6 muestra los resultados de la eficiencia de los dos detectores cuando la muestra se encuentra en el centro del pórtico situado a 1,65 m de la superficie de detección para una muestra de cesio-137 de actividad 370 kBq. En este caso la eficiencia es mucho menor en el centro del pórtico que en la superficie del detector, esto hay que tenerlo en cuenta porque en el trabajo de rutina, las fuentes que puedan ser detectadas, no pasan por la superficie sino por la zona central de los pórticos y sus emisiones están atenuadas por la chatarra.

4.4. ENSAYOS DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LOS DETECTORES

La tabla 7 muestra los resultados de la eficiencia de los dos detectores cuando la muestra pasa por el centro del pórtico a 2,30 m de la superficie de detección para una muestra de cesio-137 de actividad 370 kBq.

En la tabla 8 se presenta el límite de detección dinámica de la tasa de dosis y de la actividad para un fondo medido de 4019 y 4722 cuentas en los detectores 1 y 2, respectivamente, y para un número de 8 sigmas en medidas de 1 segundo.

Los límites de detección dinámicos obtenidos en los detectores, son inferiores al límite de detección sugerido en la norma ANSI A42.35 (ANSI, 2006b) para los pórticos, que es de 600 kBq (en pórticos separados 5 m, lo que equivale a tener la muestra a 2,5 m).

En cuanto a la relación de las ventanas en los ensayos dinámicos, se observa que al pasar la muestra de referencia de cesio, sólo se produce variación en la relación de ventanas V1/V2 (figura 9). Esto es debido a que en esta relación es donde se detecta el cesio-137. No se produce variación ni para la relación V2/V3 ni para V4/V1, ya que corresponden a la detección de cobalto-60 y al ruido electrónico del equipo, respectivamente.

	Límite tasa dosis, en nSv/h	Límite actividad, en kBq
Detector 1	10,5	579
Detector 2	9,6	536
Media	10,05	557,5

TABLA 8. Límites de detección dinámicos de los detectores.

5. RECOMENDACIONES SOBRE LA UTILIZACIÓN DE LOS DETECTORES TIPO PÓRTICO EN LA INDUSTRIA DEL METAL

A la vista de estos resultados se propone que antes de la utilización de los detectores de radiación tipo pórtico para la medida rutinaria se lleven a cabo una serie de procedimientos:

1. Procedimiento de recepción del equipo.

- Comprobación del potencial de trabajo del equipo.
- Determinación del fondo del equipo.
- Determinación de la eficiencia estática en el centro del detector, utilizando una fuente poco activa de cesio-137, de aproximadamente 37 kBq.
- Determinación de la eficiencia estática en el centro del pórtico, utilizando una fuente activa de cesio-137, de aproximadamente 370 kBq.

2. Procedimiento de verificación del funcionamiento del equipo.

- La verificación del equipo sería conveniente realizarla antes de empezar las medidas de rutina con el equipo para comprobar que su funcionamiento es el adecuado. Este tipo de verificación no tendría que llevar más de 15 minutos.
- Comprobación de los niveles de fondo.
 - Determinación de la eficiencia estática en el centro del detector.
 - Determinación de la eficiencia estática en el centro del pórtico.

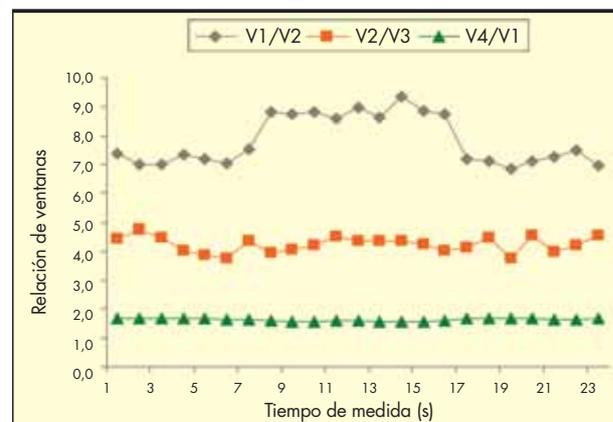


FIGURA 9. Relación de ventanas del detector 1 al pasar una fuente de cesio-137 de 370 kBq a través de los detectores.

3. Procedimiento de calibración del equipo. Este procedimiento debería realizarse con una frecuencia semestral o anual para comprobar la respuesta dinámica del equipo frente al paso de muestras radiactivas (determinación de la eficiencia dinámica y del límite de detección dinámico). Se recomienda que no dure más de 2 o 3 horas, tendría lugar el mantenimiento y el ajuste de aquellos parámetros que debido a la utilización rutinaria y continua del equipo pueden haber variado su respuesta. Este procedimiento podría ser realizado por una persona externa a la instalación con suficiente capacidad.

6. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. El fondo de los detectores 1 y 2 disminuye cuando se coloca el blindaje de plomo en un 21 % y en un 12 %, respectivamente.
2. La relación de fondos entre los cuatro discriminadores del equipo permite establecer unos factores que proporcionan un nivel base o de referencia para la detección de material contaminado en una determinada zona energética.
3. Los potenciales de trabajo de los tubos fotomultiplicadores obtenidos mediante las diferentes técnicas utilizadas (método de las pendientes de la curva característica, cálculo automático y mediante la determinación de la figura de mérito) son similares. El rango varía entre 886 V hasta 910 V en el caso del detector 1, y desde 890 V hasta 925 V en el caso del detector 2.
4. Se calculó el valor medio de estos potenciales, obteniéndose unos valores de 899 V y 915 V, respectivamente. Estos potenciales son similares a los potenciales de trabajo establecidos por el fabricante por lo que se decidió no variarlo para el resto de ensayos.
5. La eficiencia con la muestra de 370 kBq es menor que la obtenida con 37 kBq, esto es debido a que la muestra de actividad 370 kBq en contacto con la superficie del panel produce la saturación del detector recogiendo menos emisiones y disminuyendo la eficiencia (efecto del tiempo muerto).
6. Se ha representado la eficiencia en la superficie del detector en función de la posición de la fuente y, tanto en su coordenada de abscisas como de ordenadas, se puede ajustar a una función de segundo grado. Los coeficientes de determinación en los diferentes ajustes han variado entre 0,960 y 0,997.
7. La eficiencia en la superficie del detector para el cesio-137 ha sido próxima al 15 %, mientras que la eficiencia estática en el centro del pórtico, situado a 1,65 m, ha sido aproximadamente del 0,30 %.
8. Los valores de la eficiencia dinámica, en el centro del pórtico, situado a 2,30 m, han sido 0,09 % para el detector 1 y 0,10 % para el detector 2.
9. El límite de detección dinámico expresado como tasa de dosis, es de 10,5 y 9,6 nSv/h, y expresado en kBq, los valores para cada detector son 579 kBq y 536 kBq, respectivamente. Estos valores están por debajo del valor fijado en la norma ANSI A42.35 (ANSI, 2006b) para los pórticos y que es de 600 kBq.
10. Al estudiar la relación de ventanas al paso de la muestra de cesio-137, se observa que se produce un aumento

de la relación V1/V2 (relación que detecta el cesio-137) al producirse la detección por parte del pórtico, mientras que las otras dos relaciones, permanecen sin cambio (V2/V3 y V4/V1).

7. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado bajo el proyecto *Investigación sobre equipos para la detección y control de material radiactivo*, orden FOM/3929/2005 de 12 de diciembre (BOE 16-12-2005) del Ministerio de Fomento, y bajo una beca de formación de personal investigador financiada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (BOE 17-10-2007).

8. BIBLIOGRAFÍA

- American National Standard Institute (ANSI) 2006a. *Performance Criteria for Spectroscopy-Based Portal Monitors used for Homeland Security*. ANSI N42.38-2006.
- American National Standard Institute (ANSI) 2006b. *Evaluation and Performance of Radiation Detection Portal Monitors for Use in Homeland Security*. ANSI N42.35-2006.
- Blaauboer, R., Overwater, R. 2004. *Detectie van radioactief schroot met poortdetectoren*. Verslag van een ringonderzoek. Holanda. RIVN-610100006:2004 (en holandés).
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2003a. *Información sobre las actuaciones en la chatarrería de Gijón (Asturias)*. Nota de prensa de 14 de agosto de 2003.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2003b. *Control radiológico de actividades de recuperación y reciclado de chatarras*. Guía de seguridad 10.12.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2007. *Información sobre Sidenor Industrial (Reinosa, Cantabria)*. Nota de prensa de 26 de marzo de 2007.
- Dirección General de la Energía. 2000. *Resolución por la que se autoriza la transferencia a ENRESA del material radiactivo que se detecte en la chatarra o en su procesado*.
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2006. *Technical and functional specifications for border monitoring equipment*. Reference Manual. IAEA Nuclear Security Series, N°1.
- Knoll, F. 2000. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Lubenu, J., Yusko, J. 1995. *Radioactive materials in recycled metals*. Health Physics 68, 440-451.
- Lubenu, J., Yusko, J. 1998. *Radioactive materials in recycled metals – an update*. Health Physics 74, 293-299.
- Ministerio de Industria, España. 1999. *Protocolo de colaboración sobre la vigilancia radiológica de los materiales metálicos*.
- O'Grady, J., Hone, C., Turvey, F.J. 1996. *Radiocesium contamination at a steel plant in Ireland*. Health Physics 70, 568-572.
- Ortiz, T. 2008. *La detección de materiales radiactivos en chatarras. La experiencia de ENRESA*. Radioprotección 55, 22-28.
- Rodríguez, M., Marco-Arbolí, M., Gil, E. 2001. *Plan de formación en radiactividad y protección radiológica para el personal de las empresas nacionales siderúrgicas y de recuperación*. 1998-2001.
- UE. 2002. *Council resolution on the establishment of national systems for surveillance and control of the presence of radioactive materials in the recycling of metallic materials in the Member States*. C119, 22/5/2002.