



## Caracterización de detectores de neutrones de $b+zns(ag)$ como alternativa a los detectores de $^3he$ .

Juan A. González<sup>1</sup>, María J. Suárez<sup>1</sup>, Luis Pujol<sup>1</sup>, Alfredo Lorente<sup>2</sup> y Eduardo Gallego<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid (UPM)  
E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos  
Ciudad Universitaria  
28040 Madrid, Spain  
[juanantonio.gonzalez@upm.es](mailto:juanantonio.gonzalez@upm.es)  
[mriajose.suarez@upm.es](mailto:mriajose.suarez@upm.es)  
[luis.pujol@upm.es](mailto:luis.pujol@upm.es)

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid  
E.T.S.I. Industriales  
Jose Gutierrez Abascal, 2  
28006 Madrid, Spain  
[alfredo.lorente@upm.es](mailto:alfredo.lorente@upm.es)  
[eduardo.gallego@upm.es](mailto:eduardo.gallego@upm.es)

---

### RESUMEN

El objetivo de esta ponencia es presentar los avances realizados en el diseño de prototipos para la detección dinámica de neutrones, basados en detectores de centelleo de B+ZnS(Ag), que puedan sustituir a los detectores actuales de  $^3He$ , para la detección del tráfico ilícito de material radiactivo y material nuclear especial. Estos detectores de B+ZnS(Ag) se pueden utilizar, junto con detectores gamma, de PVT y de NaI(Tl) también desarrollados en la UPM. Se han caracterizado dos detectores de neutrones de distinta forma y tamaño utilizando dos fuentes de neutrones de  $^{241}Am+Be$ . Se han determinado su fondo, eficiencia total, eficiencia intrínseca y límite de detección. Los resultados obtenidos en estos ensayos permiten verificar que: 1) dos detectores cilíndricos de B+ZnS(Ag) de 5x68 cm, o un detector rectangular de 4x15x132 cm, pueden sustituir al detector cilíndrico de  $^3He$  de 5x180 cm empleado actualmente en los pórticos, 2) el límite de detección dinámico obtenido es inferior a 20000 neutrones por segundo, cuando la muestra pasa a 2 m a 2 m/s, con una probabilidad de no tener falsos positivos o negativos del 99,99 % 3) la electrónica digital elimina las interferencias de las emisiones de muestras gammas cuando su tasa de dosis en el detector de neutrones es de 65  $\mu Sv/h$ , en un factor inferior a  $10^{-8}$  y se mantiene su límite de detección y 4) dos detectores cilíndricos con dos moderadores de diferente espesor, de 25 y 50 mm de polietileno de alta densidad, permitirían medir la energía media de los neutrones.

---

## 1. INTRODUCTION

El método más efectivo para la localización y búsqueda de muestras radiactivas, es emplear equipos dinámicos de detección. Estos equipos suelen tener detectores de grandes dimensiones de PVT o de NaI(Tl) para la detección de las emisiones gamma del material radiactivo, y detectores de  $^3\text{He}$  para la detección de los neutrones que emite el material nuclear especial. Diversos países emplean estos equipos dinámicos fijos para la inspección de personas, vehículos y contenedores, en aduanas y puntos críticos, o equipos dinámicos instalados en vehículos, para asegurar por barrido del terreno, la presencia o ausencia de muestras radiactivas de una actividad considerable.

A raíz de los ataques terroristas del 11 de septiembre se incrementó la demanda de detectores de  $^3\text{He}$ . Como consecuencia de ello, la producción de dicho gas no es suficiente para satisfacer la demanda del mercado y ello ha motivado la búsqueda de alternativas para la detección de neutrones [1]. En este trabajo se presentan los resultados de la investigación en nuevas técnicas de detección dinámica de neutrones basados en detectores de B+ZnS(Ag) que puedan sustituir a los detectores actuales de  $^3\text{He}$ , para la detección del tráfico ilícito de material radiactivo y material nuclear especial.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. Generalidades de los Detectores de Neutrones de B+ZnS(Ag)

Los detectores de B+ZnS(Ag), están basados en la reacción de los neutrones térmicos con el  $^{10}\text{B}$  presente en el B natural, que es solo el 18 %, y en la transformación de sus emisiones por el ZnS(Ag) en impulsos de luz. Estos impulsos de luz tienen del orden de 120000 fotones de 450 nm. Las emisiones gamma también generan impulsos de luz, pero tienen muchos menos fotones y, un ascenso y descenso más rápido que los impulsos que producen los neutrones.

La zona sensible del detector, es una capa muy fina de 0,1 mm, formada por una mezcla de pequeños granos de  $\text{B}_2\text{O}_3$  y de centelleador de ZnS(Ag), que está colocada sobre la superficie de una

barra cilíndrica o rectangular de metacrilato, PMMA, que actúa como guía de luz de los impulsos del centelleador y como moderador adicional de los neutrones. Aunque el detector es muy fino muchos de los fotones se atenúan antes de alcanzar el metacrilato.

Los impulsos de luz del detector se propagan por la barra de PMMA y se transforman en impulsos eléctricos con uno o dos PMTs R6231 Hamamatsu, situados en los extremos. Los impulsos eléctricos, se suman, amplifican, discriminan y analizan en el USB-Base, conectado al PMT, que también tiene integrado un multicanal digital, un contador, el generador de alta tensión, el divisor de la tensión del PMT y el control desde el ordenador

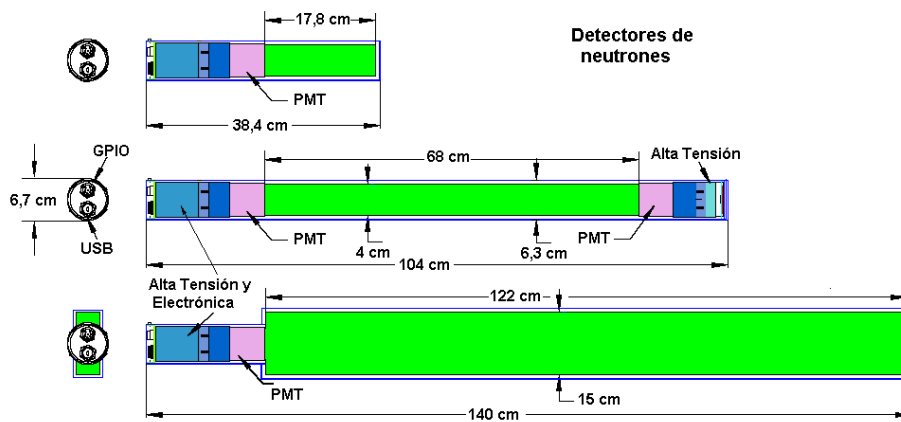
Los detectores se rodean con un moderador de polietileno de alta densidad, PEAD, que tiene 5 cm de espesor en sus caras laterales, y 2,5 cm en su cara frontal, que quitan energía a los neutrones energéticos y facilitan la dispersión de los neutrones moderados.

Las medidas se realizan con dos fuentes de neutrones de  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  de 69 y 104 GBq, y con dos fuentes gamma de  $^{226}\text{Ra}$  de 1,11 MBq cada una.

## 2.2. Detectores de Neutrones de B+ZnS(Ag)

En este trabajo se ajustan y calibran cuatro detectores de neutrones de centelleo, de grandes dimensiones, de B+ZnS(Ag) fabricados, con su electrónica digital, por Bridgeport (Fig. 1):

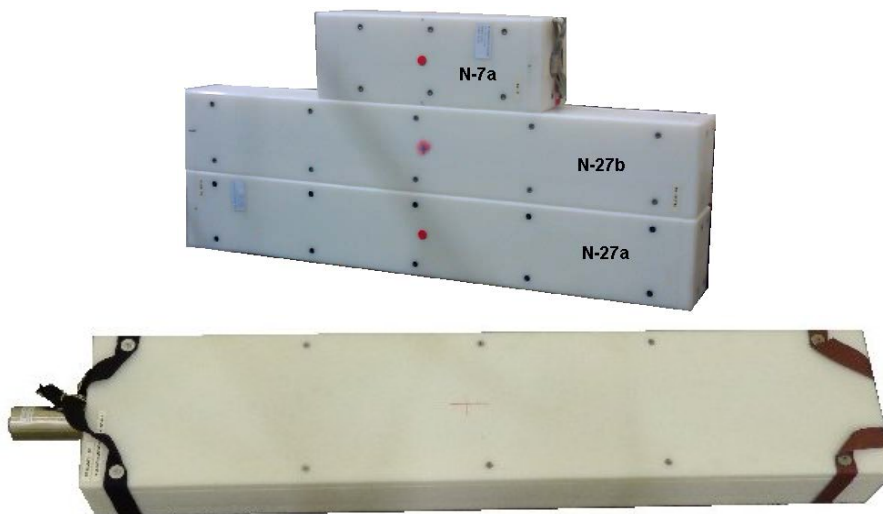
- El detector nDet-2x7, es cilíndrico, con un diámetro de 4,8 cm y una longitud de 17,8 cm, y tiene un fotomultiplicador R6231 de Hamamatsu, conectado a un USB-Base;
- Los dos detectores nDet-2x27, también son cilíndricos, con un diámetro de 4,8 cm y una longitud de 68,6 cm. Tienen dos PMTs en sus extremos, uno conectado a un HV-Base y el otro un USB-Base, donde se suman y analizan las señales de los dos;
- El detector r2Dn-6x48, es rectangular, de 3,8x15x122 cm, y tiene un PMT conectado a un USB-Base. Ha sido diseñado por la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, y fabricado por Bridgeport.



**Figura 1.** Esquema de los detectores de neutrones de  $B+ZnS(Ag)$  empleados en los ensayos.

### 2.3. Moderadores de los detectores

El moderador de neutrones de polietileno de alta densidad, PEAD, es rectangular, y rodea todo el detector para mejorar tanto la capacidad de detección de los neutrones directos de gran energía, como de los neutrones dispersos en el aire o las paredes. Las caras laterales del PEAD son de 50 mm y la frontal de 25 mm (Fig. 2).



**Figura 2.** Moderadores de los detectores N-7a, N-27a y N-27b.

## 2.4. Ensayos realizados

### 2.4.1. Ajuste de la alta tensión y del discriminador de la forma de los impulsos

La alta tensión y el discriminador de la forma de los impulsos se han ajustado mediante una fuente de neutrones de  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  de 69 GBq, cuando está dentro del moderador del Howitzer (Fig. 3), y se realizan medidas de los neutrones moderados y de las emisiones gamma de 2,2 MeV. El detector de neutrones se ha colocado a 100 cm de la fuente de neutrones variando la alta tensión y variando los parámetros P1 y P2 del discriminador, que corresponden con el tiempo de descenso y ascenso de los impulsos, respectivamente. Estos dos parámetros diferencian la forma de los impulsos gamma de los impulsos de los neutrones.



**Figura 3.** Contenedor Howitzer con la fuente de neutrones de  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  de 69 GBq.

### 2.4.2. Calibración de los detectores de neutrones

La calibración de los detectores de neutrones permite conocer la eficiencia para los neutrones directos y los neutrones dispersos, el fondo en la sala, en el laboratorio y en el exterior, y la interferencia de las emisiones gamma en la medida de los neutrones. Con estos valores se puede cuantificar el límite de detección, en las condiciones de la calibración, o cuando se varían las condiciones de la medida o del detector, como la distancia entre la fuente y el detector, el número de detectores o su longitud. En la calibración de los detectores se fijan los parámetros de la alta tensión y de los dos discriminadores de la forma de impulsos, que se han obtenido en el ajuste realizado en el apartado anterior.

En la sala de neutrones, se obtiene el fondo y la eficiencia de los neutrones directos y dispersos. La eficiencia de detección de los neutrones directos en la sala se obtiene colocando la fuente de  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  de 104 GBq, por métodos neumáticos sin moderador en la bancada (Fig. 4), a 2 m del detector.



**Figura 4.** Bancada con la fuente de neutrones de  $^{241}\text{Am}+\text{Be}$  de 104 GBq.

La eficiencia de detección de los neutrones dispersos se obtiene colocando una pirámide de 20 cm de hierro y 30 cm de PEAD, como un cono de sombra, que impide que los neutrones directos de la fuente alcancen el moderador del detector (Fig. 5).



**Figura 5.** Pirámide de sombra de los neutrones directos.

### 2.4.3. Interferencia de las emisiones gamma

Las medidas de la interferencia de las emisiones gamma se realizan comparando las medidas del fondo del laboratorio con y sin dos fuentes de  $^{226}\text{Ra}$  de 2,2 MBq, colocadas sobre el PEAD, cuya tasa de dosis a 2,5 cm es de  $65 \mu\text{Sv/h}$  (Fig. 6).

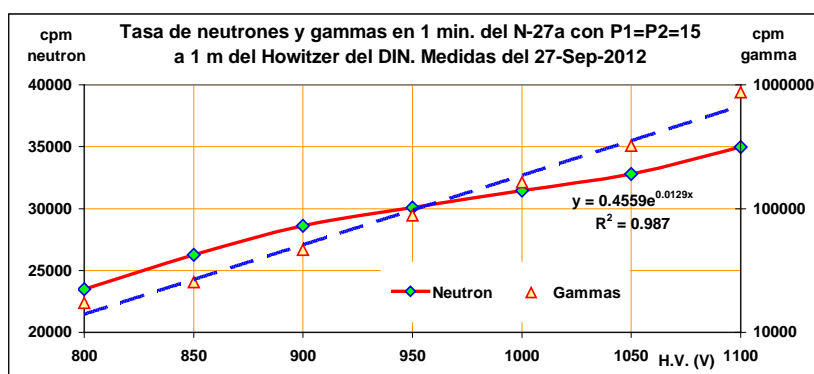


**Figura 6.** Medida de la interferencia de las emisiones gamma de dos fuentes de  $^{226}\text{Ra}$  en el detector de neutrones N-27a.

## 3. RESULTADOS

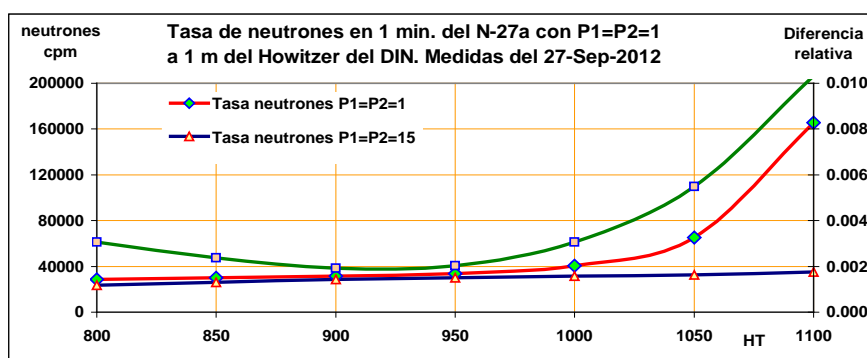
### 3.1. Ajustes de la Alta Tensión y de los Parámetros de la Forma del Impulso

En la Fig. 7 se observa que al variar la alta tensión también varían las detecciones de neutrones y gamma. La variación de la tasa de las detecciones de los neutrones presenta una zona con menor pendiente, que equivale al plateau de la zona de trabajo. La variación de la tasa de las detecciones gamma crece exponencialmente.



**Figura 7.** Tasa de las detecciones de neutrones y gammas en el detector N-27a al variar la alta tensión de los tubos fotomultiplicadores.

En la Fig. 8 se observa que la alta tensión óptima está cerca de 900 V y que la diferencia relativa, entre la tasa de las detecciones de neutrones y gammas, se incrementa de forma sustancial al subir la alta tensión. También se observa que los parámetros P1=P2=15 producen mejores resultados.



**Figura 8.** Tasa de las detecciones de neutrones y gammas y de su diferencia relativa.

### 3.2. Calibración de los detectores de neutrones

Los datos de las medidas del detector N-27a son los indicados en la Tabla 1.



**Tabla 1.** Calibración del detector de neutrones N-27a

| <b>Medidas de calibración con la fuente de Am-241+Be del N-27a en el DIN el 27-Sep-2012</b> |                              |                    |                    |                           |                  |          |             |
|---|------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|------------------|----------|-------------|
| Superficie=   | 326,6 cm <sup>2</sup>        | Muestra 2 (+- 3%)= |                    | Actividad =               | 104 GBq          | Intens = | 6,19E+6 n/s |
| Medida en:  | La sala de neutrones del DIN |                    |                    | El Laboratorio            |                  | Exterior |             |
| Condiciones   | Fondo                        | Am-241             | Am-241             | Fondo                     | Fondo            | Fondo    | Unidad      |
| Medida:   | distancia                    | 200 cm             | Con cono           | Fondo                     | Gammas           | Fondo    |             |
| Tiempo  | 8,0                          | 3,1                | 3,2                | 78,8                      | 60,1             | 256,5    | min         |
| Neutrones   | 1579                         | 87134              | 27272              | 23                        | 26               | 39       | cpm         |
| Señales   | 2409                         | 92409              | 29393              | 473                       | 1470             | 701      | cpm         |
| Eficiencia Total =  |                              | 230,3              | 69,2               | Ra-226 - Act = 2220,0 kBq |                  |          | cps/Mn/s    |
| Eficiencia Intrínseca =   |                              | 35,4%              | 10,6%              | Rechazo = 4,E-09 Gam/Neut |                  |          | %           |
| Limite de detección =   | 26317 n/s                    |                    | Detector de 69 cm  |                           | Distancia 200 cm |          | Cálculo     |
| Limite de detección =   | 18609 n/s                    |                    | Detector de 137 cm |                           | Distancia 200 cm |          | Cálculo     |

El detector N-27a, puede detectar una fuente de neutrones de 26317 n/s. Dos detectores de neutrones de este tamaño, cuya longitud es 137 cm, pueden detectar a 200 cm, en un segundo, una fuente de neutrones de 18609 n/s. En este formato de procedimiento de ajuste y de calibración también se obtienen: el valor de la interferencia de las emisiones gamma y el límite de detección para medidas de 1 s con una probabilidad del 99,99 %.

Para comparar los datos de los detectores N-7a, N-27a, N-27b y N-48a, se presentan los resultados de los fondos en el exterior, las eficiencias de las emisiones directas y dispersas en la sala y de los límites de detección en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Comparación de la eficiencia, fondo y del límite de detección de los cuatro detectores de neutrones de B+ZnS(Ag).

| <b>Medidas de la eficiencia y del fondo de los neutrones con la fuente de Am-241+Be en el DIN a : 200 cm</b> |                                     |            |                        |                       |                        |                       |                      |                  |                        |        |
|--|-------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|------------------------|--------|
| Actividad de muestra =   |                                     | 104 GBq    |                        |                       | Intensidad neutrones = |                       | 6,19E+6 n/s          |                  | Limite de Detección a: | 200 cm |
| Detector de neutrones  | Sección detección                   | Fondo sala | Am-241 directo         | Am-241 con cono       | Fondo exterior         | Eficiencia directos   | Eficiencia dispersos | Limite detección |                        |        |
| N-7a   | 85 cm <sup>2</sup><br>09-sep-2012   | 233 cpm    | 21739 cpm<br>358 c/s   | 7133 cpm<br>115 c/s   | 11 cpm<br>0,2 c/s      | 58 cps/Mn/s<br>34,4%  | 19 cps/Mn/s<br>11,0% | 56715 n/s        |                        |        |
| N-27a  | 327 cm <sup>2</sup><br>09-oct-2012  | 1579 cpm   | 87134 cpm<br>1426 c/s  | 27272 cpm<br>428 c/s  | 39 cpm<br>0,7 c/s      | 230 cps/Mn/s<br>35,4% | 69 cps/Mn/s<br>10,6% | 26317 n/s        |                        |        |
| N-27b  | 327 cm <sup>2</sup><br>27-oct-2012  | 738 cpm    | 79450 cpm<br>1312 c/s  | 24166 cpm<br>390 c/s  | 29 cpm<br>0,5 c/s      | 212 cps/Mn/s<br>32,6% | 63 cps/Mn/s<br>9,7%  | 24703 n/s        |                        |        |
| N-48a  | 1830 cm <sup>2</sup><br>05-nov-2012 | 3296 cpm   | 303340 cpm<br>5001 c/s | 78818 cpm<br>1259 c/s | 95 cpm<br>1,6 c/s      | 808 cps/Mn/s<br>22,2% | 203 cps/Mn/s<br>5,6% | 11656 n/s        |                        |        |

El análisis de los resultados obtenidos indica:

- La eficiencia total de los tres detectores cilíndricos, es casi proporcional a su longitud, y su eficiencia intrínseca es muy parecida;
- El fondo de los detectores es proporcional al producto de su sección de detección por la eficiencia intrínseca;
- El detector N-48a, puede detectar una fuente de 11656 n/s, en 1 s, a 2 m;
- Tanto el detector N-48a como dos detectores N-27 cumplen los requisitos establecidos en la normativa internacional para la detección de neutrones [2].

### 3.3. Interferencia de las emisiones gamma

La interferencia de las emisiones gamma de dos fuentes de  $^{226}\text{Ra}$  de 2,22 MBq, cuya tasa de dosis en el detector es de 65  $\mu\text{Sv/h}$ , incrementa la detección de neutrones solo en 0,05 n/s, lo que equivale a un rechazo de las emisiones gamma de  $4 \times 10^{-9}$ .

## 4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido establecer un procedimiento para el ajuste y calibración de diferentes detectores de neutrones de B+ZnS(Ag). El procedimiento establecido ha permitido determinar el límite de detección dinámico de estos detectores. Se ha observado que el límite obtenido para dos detectores cilíndricos de B+ZnS(Ag) de 5x68 cm, o un detector rectangular de 4x15x132 cm, es similar al detector cilíndrico de  $^3\text{He}$  de 5x180 cm empleado actualmente en los pórticos. Este resultado permite establecer la viabilidad del diseño de prototipos de detectores de neutrones basados en B+ZnS(Ag) como alternativa a los detectores de  $^3\text{He}$ .

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. (ENRESA) en virtud de un convenio de investigación, y por INDRA Sistemas, SA, por el acuerdo de colaboración, en el marco del programa CENIT, destinado a fomentar la cooperación estable público-privada en investigación. Los autores de este

trabajo agradecen al personal de dichos organismos su colaboración con los expertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. P. Peerani, A. Tomanin, S. Pozzi, J. Dolan, E. Miller, M. Flaska, M. Battaglieri, R. de Vita, L. Ficini, G. Ottonello, G. Ricco, G. Dermody, C. Giles, “Testing on novel neutron detectors as alternative to  $^3\text{He}$  for security applications” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **696**, pp.110-120 (2012).
2. ANSI-42.35: 2006, *American National Standard for Evaluation and Performance of Radiation Detection Portal Monitors for Use in Homeland Security*, New York (2007).