

DISPOSITIVO PLASMA FOCUS COMO FUENTE PULSADA DE NEUTRONES DE FUSIÓN D-D PARA IDENTIFICACIÓN DE NUCLEIDOS POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA: PRIMEROS RESULTADOS

M. Milanese, J. Niedbalski, R. Moroso, M. Barbaglia¹, R. Mayer², L. Supán, S. Guichón

Instituto de Física Arroyo Seco (IFAS) - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Pinto 399 - (7000) Tandil - Buenos Aires - Argentina

1 PLADEMA

2 Instituto Balseiro (CAB-CONEA)

E-mail: jniels@exa.unicen.edu.ar

Recibido 10/01/2011; aprobado 1/08/2012

La activación por captura neutrónica de núcleos atómicos componentes de sustancias y el subsiguiente registro del espectro de radiación gamma instantánea y/o de decaimiento temprano característico emitida por los mismos, constituye una técnica de análisis no destructivo y extremadamente sensible que posibilita tanto identificarlos como determinarlos cuantitativamente. Para esta finalidad, se requiere irradiarlos con haces de neutrones cuyas energías estén típicamente comprendidas en los rangos térmicos y epitérmicos. Para un gran número de nucleidos y sus correspondientes isótopos estos rangos energéticos permiten maximizar la sección eficaz de captura nuclear. En la práctica, se recurre corrientemente al empleo de fuentes de neutrones constituidas por radioisótopos (naturales y artificiales) de relativamente alta actividad y largo tiempo de vida de decaimiento (^{226}Ra - ^9Be , ^{252}Cf , etc), que son difícilmente asequibles y de manipulación peligrosa o bien a instalaciones que por sus dimensiones físicas y complejidad estructural resultan de imposible traslado (reactores nucleares de investigación, aceleradores de partículas, etc.). En esta comunicación se presentan primeros resultados del empleo de un dispositivo plasma focus de relativamente baja energía operativa (2kJ, 31kV) como fuente generadora y transportable de haces de neutrones de fusión D-D (2.45 MeV) para el análisis de sustancias "in situ" por activación. Se muestra un simple espectro conteniendo la línea de emisión característica de 446.8 keV del isótopo ^{110}Ag resultante de la reacción nuclear $^{109}\text{Ag}(n, e\nu\gamma)^{110}\text{Ag}$ que es activada por irradiación de una muestra de Ag natural con neutrones moderados producidos a partir de los energéticos que proporciona el dispositivo plasma focus. La emisión es registrada mediante un sistema convencional para espectroscopía gamma basado en un cristal de NaI(Tl)-Fotomultiplicador acoplado a un circuito amplificador y de adquisición de datos multicanal controlado por software.

Palabras Clave: química de sustancias, captura neutrónica, activación nuclear, radiación gamma.

Activation by atomic nuclei neutron capture of substance components and the subsequent registration of the instantaneous and/or early decay gamma characteristic radiation spectrum emitted by them, constitutes a non-destructive and extremely sensitive analysis technique that enables its identification and quantitative determination. For this purpose, it is necessary to irradiate with neutron beams whose energies are typically comprised within the thermal and epithermal ranges. For a large number of nuclides and their corresponding isotopes, these energetic ranges make possible to maximize the nuclear capture cross section. In practice, the currently used neutron sources are constituted by radioisotopes (natural and artificial) which are hardly affordable and dangerous handling or well to facilities that, due to their physical dimensions and structural complexity, result impossible to be transported (nuclear research reactors, particles accelerators, etc.). In this paper, we present the first results of employing of a relatively low-energy (2 kJ, 31 kV) plasma focus device as a portable source of pulsed neutrons beams (2.45 MeV) generated by nuclear fusion reactions D-D, for the "in situ" analysis of substances by nuclear activation. We show a simple spectrum containing the characteristic emission line of 446.8 keV of the ^{110}Ag isotope resulting of the nuclear reaction $^{109}\text{Ag}(n, e\nu\gamma)^{110}\text{Ag}$, which is activated by irradiation of a Ag natural sample with moderated neutrons produced starting of energetic neutron beams proportioned by the plasma focus device. The emission is registered by means of a conventional spectroscopic gamma system based on NaI(Tl) crystal-Fotomultiplier, coupled to an amplifier and data-acquisition multichannel circuit controlled by software.

Key Word: substances chemical analysis, neutron capture, nuclear activation, gamma radiation.

I. INTRODUCCIÓN

Por su alta capacidad de penetrar con profundidad la estructura de la materia condensada, el empleo de haces de neutrones resulta de considerable interés para estudios de carácter no invasivo. Entre la muy amplia variedad de aplicaciones, se destaca como de particular interés la identificación de elementos químicos en la composición

de estructuras moleculares de sustancias por activación neutrónica de sus núcleos atómicos componentes y el subsiguiente registro de la radiación gamma tanto instantánea PGNA (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis) como de decaimiento retardado DGNA (Delayed Gamma Neutron Activation Analysis) características emitidas por los mismos⁽¹⁻⁴⁾. La implementa-

ción práctica de este método de análisis requiere del empleo de haces de neutrones dentro de rangos de energía que comprenden fundamentalmente a los térmicos ($E = 25$ meV) y epitérmicos (0.25 meV $< E < 10$ keV). Estas energías posibilitan, para un gran número de nucleidos y sus correspondientes isótopos, maximizar la sección eficaz de captura nuclear. Una vez irradiada la sustancia, el espectro de fotones gamma emitidos por cada especie nuclear componente de la misma durante su decaimiento radiactivo es único y constituye la característica “huella digital” o “ADN” que permite así su identificación y eventualmente su cuantificación. El método de análisis por captura neutrónica ha sido aplicado en numerosos campos de investigación tales como agricultura, biología, ciencia forense, determinaciones de contaminantes ambientales, etc. Las fuentes de neutrones para irradiación a la que normalmente se recurre están fundamentalmente constituidas, en primer lugar, por radioisótopos de relativamente alta actividad (A) y mediano y largo tiempo de vida de decaimiento (τ) como el actínido ^{252}Cf ($A = 170 \times 10^6$ n/min por μg y $\tau = 2.64$ años) resultante del bombardeo de ^{242}Cm con partículas α o bien a mezclas de algún emisor α como ^{226}Ra o ^{241}Am con polvo de ^9Be , etc. Estos radioisótopos son obtenidos corrientemente a partir de residuos que resultan del “quemado” de material fisible típicamente empleado en reactores nucleares. Son de difícil asequeabilidad, costosos y de manipulación peligrosa. La segunda de las fuentes, corresponde a instalaciones de alta complejidad constructiva y que por sus dimensiones físicas resultan de imposible traslado, tales como reactores nucleares de investigación, aceleradores de partículas, etc.

En el presente trabajo se evalúa la factibilidad de un dispositivo plasma focus (PF) de relativamente baja energía operativa (2 kJ, 31 kV), como fuente limpia (no radiactiva), de alta seguridad en su manipulación y transportable, de haces pulsados de neutrones de fusión D-D (2.45 MeV), para ser empleado en el análisis “in situ” de sustancias por activación nuclear. Dicha evaluación, está enmarcada en un Proyecto de Investigación que tiene como objetivo específico la detección de elementos químicos en estructuras moleculares constituyentes de sustancias peligrosas tales como explosivos, tóxicos, material fisionable, etc.^(5,6), posibles de ser transportados en contenedores de mediado y gran volumen en terminales portuarias. Se exponen resultados de experiencias de reducción de energías a niveles térmico y epitérmico de haces de neutrones proporcionadas por el dispositivo PF requeridos para optimizar el proceso de activación. Como un primer ejemplo de demostración, se irradia una muestra de Ag natural comercialmente disponible y se determina una de las líneas de emisión características (446.8 keV) correspondiente al isótopo ^{110}Ag , mediante un sistema convencional para espectroscopía gamma que emplea como detector un arreglo basado en un cristal de NaI (TI)-Fotomultiplicador.

II. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE LOS MECANISMOS DE INTERACCIÓN NEUTRÓN-MATERIA: MODERACIÓN

El neutrón es una partícula clasificada corrientemente como barión, con espín $\frac{1}{2}$ (fermión), sin carga neta efectiva, una masa de $\approx 939,5$ MeV/ c^2 , momento dipolar magnético de $-1.913 \mu_N$ ($\mu_N = 5.050 \cdot 10^{-27}$ J/T, magnetón nuclear) y momento dipolar eléctrico prácticamente nulo. Estructuralmente está constituido por tres quarks cargados eléctricamente. En estado libre es inestable con un tiempo de vida de aproximadamente 15 minutos y con modo de decaimiento beta: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$. Interacciona principalmente con la materia a través de tres procesos fundamentales: nuclear fuerte, nuclear débil, y electromagnético. Este último resulta de interés principalmente con campos magnéticos externos y es por importancia, el de menor cuantía relativa. La interacción fuerte es la predominante: tiene un alcance medio del orden de 10^{-13} mm y de acuerdo a la cromodinámica cuántica su mecanismo físico básico se funda en el intercambio de gluones entre los diferentes quarks.

A los efectos de reducir su energía cinética (moderación), los procesos colisionales de interés que pueden tener lugar entre un neutrón y núcleos atómicos constituyentes de la estructura de la materia durante su propagación a través de la misma, son clasificados desde un punto de vista microscópico en: dispersión elástica e inelástica. En el primero de éstos, la energía cinética total del sistema neutrón-núcleo permanece constante: durante la interacción una fracción de la energía cinética del neutrón es transferida al núcleo sin excitación interna del mismo. En el proceso de dispersión inelástica, parte de la energía cinética del neutrón es transferida al núcleo dejando a éste en un estado de excitación. Eventualmente y dependiendo de su configuración estructural interna, puede desexcitarse emitiendo radiación gamma.

Considerando la bien conocida teoría clásica de dispersión elástica entre partículas, para el caso de un neutrón que, con energía cinética inicial E_0 , colisiona con un núcleo de masa atómica A , la máxima pérdida de energía que experimenta ($\theta = \pi$) viene expresada por: Considerando la descripción clásica del proceso de dispersión elástica entre partículas para el caso de un neutrón con energía cinética inicial E_0 que colisiona con un núcleo de masa atómica A , la magnitud de su energía final E a través del decremento que experimenta viene dado por:

$$E = E_0(A - 1)^2/(A + 1)^2 \quad (1)$$

donde E es la magnitud de su energía final.

De esta expresión se deriva que, para moderar eficientemente neutrones, los núcleos atómicos con bajo A aparecen como los más apropiados. Así, la máxima reducción de energía por colisión se obtienen empleando núcleos de hidrógeno ($A = 1$). Teniendo presente que el protón carece de estructura interna posible de ser excitada, sólo pueden ocurrir procesos de dispersión elástica

o bien de captura. De manera general, la reducción de energía cinética media a través de múltiples colisiones viene expresada por:

$$E_n = E_0 [(A^2 + 1)/(A + 1)^2]^n, \quad (2)$$

donde $n = \log(E_n/E_0)/\log[(A^2+1)/(A+1)^2]$ es el número promedio de colisiones requeridas. Considerando como caso particular un haz pulsado de neutrones energéticos resultante de reacciones de fusión nuclear D-D (2.45 MeV), el número necesario para llevar su energía a nivel térmico ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ó $25 \times 10^{-3} \text{ eV}$) es $n \cong 29$. En la TABLA 1 se exponen, como ejemplo ilustrativo, algunos de los diferentes elementos e isótopo de uno de ellos, posibles de ser empleados como moderadores y el número promedio requerido para reducir la energía de neutrones de fusión al mencionado nivel de energía.

TABLA 1: NÚMERO PROMEDIO DE COLISIONES REQUERIDAS PARA REDUCIR LA ENERGÍA DE UN NEUTRÓN DE ENERGÍA INICIAL $E_0 = 2.45 \text{ MeV}$ HASTA EL NIVEL TÉRMICO ($E = 25 \text{ meV}$).

Elemento	Masa atómica (A)	# promedio de colisiones (n)
Hidrógeno	1	29
Deuterio	2	35
Berilio	9	103
Carbono	12	134

El orden de magnitud correspondiente a velocidades de neutrones moderados, puede ser estimado a partir de la expresión clásica conocida de la energía cinética. Debido a su alta masa en reposo, la posible corrección relativista a esta velocidad puede considerarse despreciable hasta una energía aproximada de 100 MeV. Despejando de la expresión clásica se obtiene $v = 1.38 \times 10^7 E^{1/2}$. En particular, para la magnitud asociada con la energía del neutrón térmico, la velocidad aproximada correspondiente es 2.2 km/s.

Por otra parte, la atenuación en intensidad experimentada por un haz de neutrones incidiendo en dirección z sobre una muestra delgada de material de densidad ρ , constituida por un simple elemento de masa atómica A , es descrita por una expresión similar a la bien conocida para un haz de rayos X:

$$I(z) = I_0 \exp(-N\sigma_t z), \quad (3)$$

donde I_0 y $I(z)$ son las intensidades del haz incidente y transmitido, respectivamente, $N = \rho N_A/A$ es la densidad de átomos de la muestra, N_A el número de Avogadro y σ_t es la sección eficaz microscópica total del elemento constituida por la combinación lineal de las secciones eficaces σ_i correspondientes a cada uno de los procesos interactivos posibles (elástico, inelástico, captura o absorción, etc.). Al producto $\Sigma_t = N\sigma_t$ se lo denomina corrientemente sección eficaz macroscópica total (SEMT). En función de ese parámetro, el camino libre medio de un neutrón dentro del volumen de la muestra viene dado

por $\lambda = 1/\Sigma_t [\text{cm}^{-1}]$. Para muestras constituidas por compuestos moleculares con diferentes átomos en su estructura, la SEMT (Σ) viene determinada por la suma de las secciones eficaces macroscópicas Σ_{ti} correspondientes a cada especie atómica. Así, para una muestra con una densidad de átomos de cada especie atómica $N_i = \rho n_i N_A/M$, donde ρ representa la densidad molecular, n_i el número de los mismos constituyentes de la molécula y M su peso molecular, la SEMT queda expresada por:

$$\Sigma = \rho N_A/M (n_1 \sigma_{t1} + n_2 \sigma_{t2} + n_3 \sigma_{t3} + \dots) \quad (4)$$

III. DETERMINACIONES EXPERIMENTALES

a) Características de la fuente de neutrones energéticos

La fuente de neutrones energéticos empleada para las experiencias de irradiación es un dispositivo PF tipo Mather⁽⁷⁾ de relativamente reducidas dimensiones. En la Fig. 1 se muestra esquemáticamente un corte transversal del mismo. La base de sustentación mecánica actual de su estructura puede ser convenientemente modificada, por ejemplo, incorporándole rodamientos a la misma para posibilitar su fácil transporte. Opera normalmente a través de una descarga relativamente rápida (Período = 4 μs) de alta tensión (31 kV) y corriente ($\approx 250 \text{ kA}$) en atmósfera de D_2 a baja presión (1.2-1.8 mbar). Como resultado de las reacciones de fusión nuclear originadas por autocompresión de plasma de deuterio en la región del foco de alta densidad y temperatura, se generan flujos de neutrones de 2.45 MeV en forma pulsada, con duración variable (disparo a disparo) entre aproximadamente 80 y 150 ns (FWHM) y con una irradiancia total distribuida en 4π srad del orden de 10^8 .

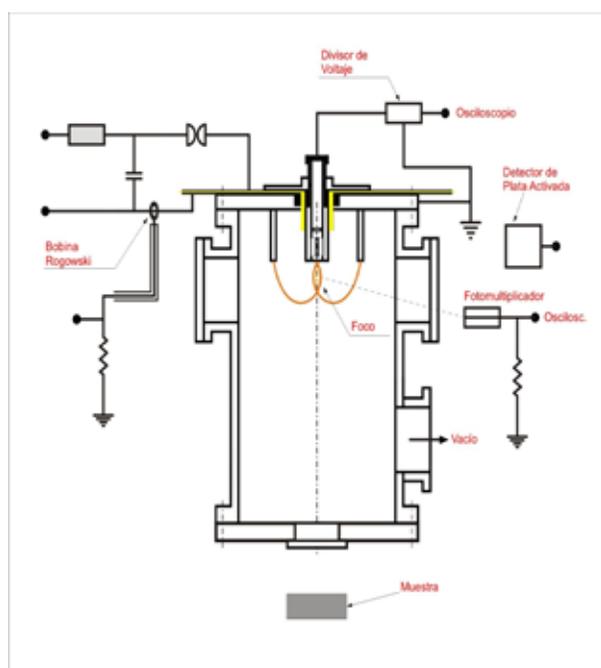


Figura 1. Corte transversal del dispositivo Plasma Focus (2kJ, 31kV) empleado como fuente de neutrones de fusión para las experiencias de irradiación.

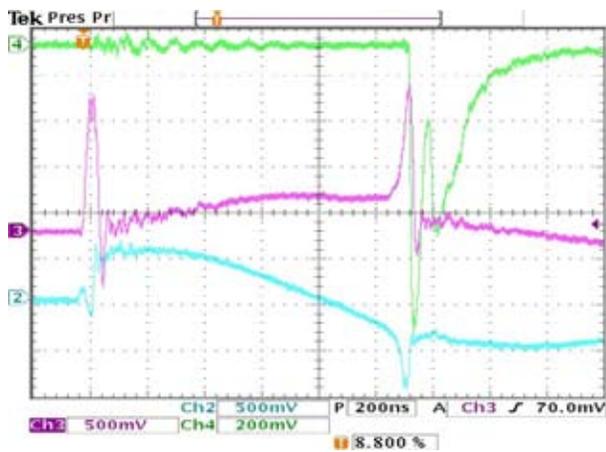


Figura 2. Oscilograma característico de las evoluciones temporales de rayos X y neutrones de fusión (traza superior), tensión de descarga (traza media) y derivada de la corriente de descarga (traza inferior), registrados simultáneamente con un disparo del dispositivo PF durante su normal operación.

En la Fig.2 se muestra un oscilograma característico conteniendo las trazas correspondientes, registradas simultáneamente, de las evoluciones temporales de rayos X duros y neutrones de fusión emitidos (traza superior), tensión de descarga (traza media) y derivada de la corriente de descarga (traza inferior). Las diagnosticas empleadas para el registro de la corriente y tensión son una bobina de Rogowski y un divisor de tensión resistivo de relativamente baja resolución temporal, respectivamente. Los pulsos de rayos X y neutrones son registrados por medio de un sistema de detección localizado a aproximadamente 2 metros de la fuente de emisión (foco) basado en un centellador plástico acoplado ópticamente a un tubo fotomultiplicador (SCF). Esa distancia permite separar adecuadamente ambos pulsos (fotones y neutrones) por tiempo de vuelo.

La emisión de rayos X constituye un proceso secundario que ocurre casi en concomitancia con la emisión de neutrones⁽⁸⁾ como resultado de la formación de un haz de electrones de alta energía en la región del foco de alta densidad y temperatura durante la etapa de compresión magnética. Evidencias experimentales sugieren que su origen es bremsstrahlung asociado con la interacción del haz de electrones con la base de sustentación mecánica del electrodo hueco de descarga sujeto a alta tensión (ánodo). Típicamente, un inserto de número atómico alto (wolframio), es incorporado en el interior del mismo para incrementar la intensidad de la emisión, vía optimización de la eficiencia de conversión bremsstrahlung.

En Fig.3 se muestra la distribución angular de la emisión de neutrones respecto del eje de simetría axial de los electrodos de descarga del PF, determinada por medio de detectores de trazas nucleares de estado sólido CR-39.

a) Características de la fuente de neutrones energéticos

Con la finalidad de estudiar el proceso de reducción de energía o “moderación” de haces pulsados

de neutrones generados por el dispositivo PF, requerido para el análisis de sustancias por activación,

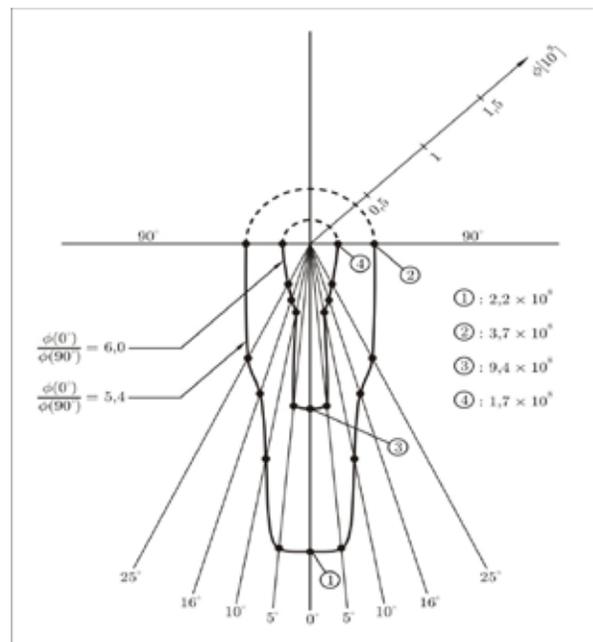
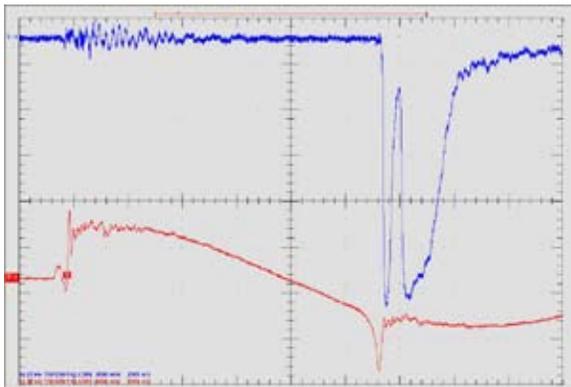


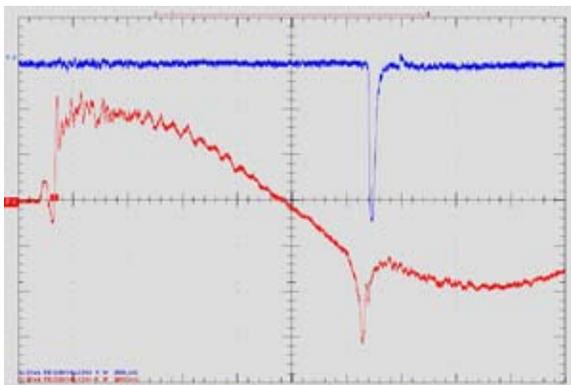
Figura 3. Distribución angular de neutrones energéticos (2.45 MeV) emitidos por el dispositivo PF, determinada por medio de detectores de trazas nucleares CR-39 de estado sólido.

se implementó un blindaje o apantallamiento total del mismo. Este blindaje tiene un doble propósito. Primero, reducir significativamente eventuales reflexiones espurias de estas partículas en paredes, piso y gran número de objetos distribuidos aleatoriamente en la región que lo circunda y que pueden afectar considerablemente el resultado de mediciones. Segundo, posibilitar la obtención de haces colimados con secciones transversales que pueden ser arbitrariamente modificadas de manera de seleccionar pequeñas áreas de irradiación de las muestras durante las experiencias de activación. Se buscaron soluciones simples, de muy bajo costo, con materiales comercialmente disponibles y principalmente con la perspectiva de ser armado y desarmado fácilmente. Por su alto contenido de átomos de hidrógeno en su estructura molecular, uno de los materiales que cumple con los mencionados requisitos pertenece al grupo de los hidrocarburos alcanos (C_NH_{2N+2}), donde N es el número de carbonos, conocido comercialmente como parafina. Empleando como diagnóstica de detección de neutrones energéticos el SCF y contadores Geiger-Müller de plata activada (CGM) se determinó mediante experiencias separadas de irradiación de diferentes espesores de parafina, que el mínimo necesario de la misma es de aproximadamente 90 mm. Basado en este resultado, se blindó el dispositivo con placas que se dispusieron en todo su contorno. Este blindaje se complementó con otro, consistente en una solución acuosa concentrada (1 Molar) de un compuesto rico en boro ($Na_2B_4O_7$), a fin de eliminar eventuales neutrones de baja energía que pudieran emerger del material de

acuerdo con la reacción nuclear $^{10}\text{B} (n, \alpha \gamma) ^7\text{Li}$. El isótopo ^{10}B (componente del soluto de la solución) presenta una alta sección eficaz de captura neutrónica σ_c que disminuye linealmente desde aproximadamente 1000 a 10 barns para energías de los mismos comprendidas entre 0.01 y 100 eV.



(a)



(b)

Figura 4. Oscilogramas característicos de los pulsos de rayos X (primer pico) y neutrones de 2.45 MeV (segundo pico), a 2m del foco, cuando éste opera sin blindaje (traza superior de a) y con blindaje de parafina de 90 mm de espesor (traza superior de b). La traza inferior, en ambos casos, corresponde a la evolución de la derivada de la corriente total de la descarga.

En la Fig. 4 se reproducen oscilogramas característicos de los pulsos de rayos X (primer pico) y neutrones (segundo pico) en la traza superior y de la derivada de la corriente de descarga (traza inferior), tal como son registrados durante la operación del dispositivo PF sin blindaje (a) y con blindaje (b). En esta última, puede apreciar claramente la desaparición del pulso de neutrones de fusión de 2.45 MeV.

c) Moderación de haces pulsados de neutrones energéticos

Para moderar el flujo de neutrones a rangos de energía térmica y epitérmica se empleó polietileno de alta densidad (PAD) cuya estructura molecular está constituida por una cadena lineal (no ramificada) obtenida a partir del etileno (C_2H_4). De acuerdo con datos proporcionados por el fabricante, este polímero tiene una densidad de 0.957 g/cm^3 y un peso molecular de $2.5 \times 10^5 \text{ g/mol}$. Entre otros posibles materiales moderadores, el PAD fue elegido por su alta densidad y de acuerdo con simulaciones numéricas realizadas empleando el Método Monte Carlo, permite reducir el libre camino medio λ del neutrón dentro de su estructura, maximizando consecuentemente la densidad de flujo saliente de los moderados a través de la misma, cuando es irradiado con haces colimados. Se emplearon placas de $45 \times 45 \text{ cm}^2$ y 8 mm de espesor que fueron dispuestas en paralelo (en un soporte especialmente construido) a los efectos de modificar por pasos el espesor de material; esto permite incrementar o disminuir el número de eventos colisionales de los neutrones con el hidrógeno del material para alcanzar distintos niveles de moderación. Las experiencias se realizaron irradiando el arreglo de placas con haces de neutrones energéticos que fueron colimados por medio de un tubo dieléctrico de 68 cm de longitud y 3.3 cm de diámetro interno y 1.6 cm de espesor que fue insertado en una de las paredes del blindaje del dispositivo PF. La Fig. 5 ilustra el esquema básico del arreglo experimental empleado.

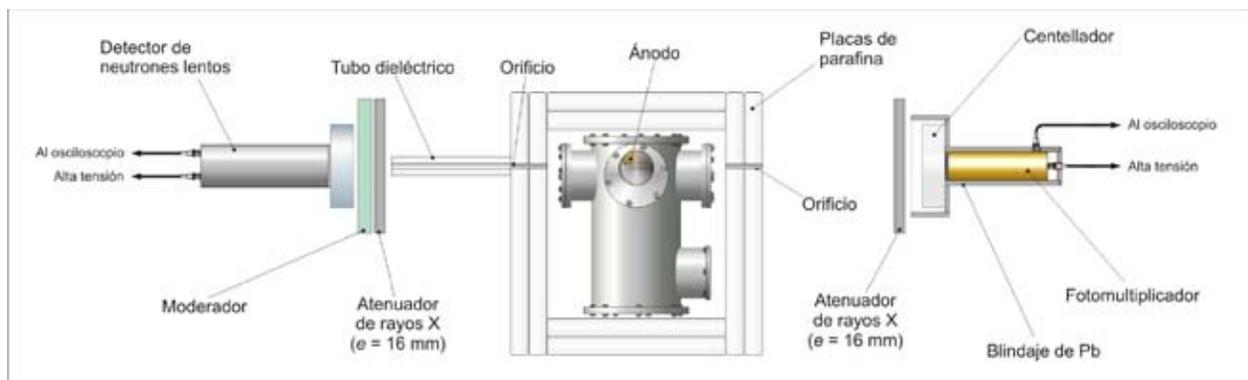


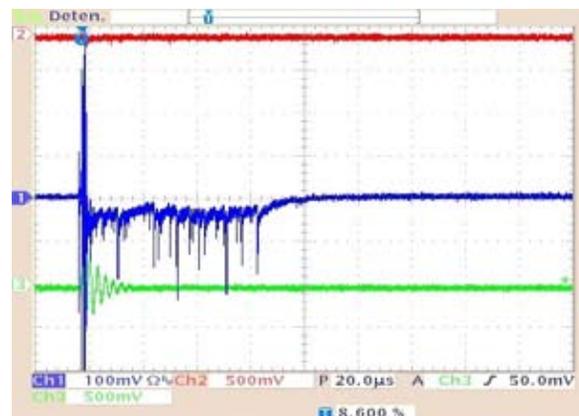
Figura 5. Esquema básico del arreglo experimental empleado para las experiencias de moderación de haces pulsados de neutrones energéticos.

Los neutrones moderados fueron registrados con un sistema de detección (SD) de última generación basado

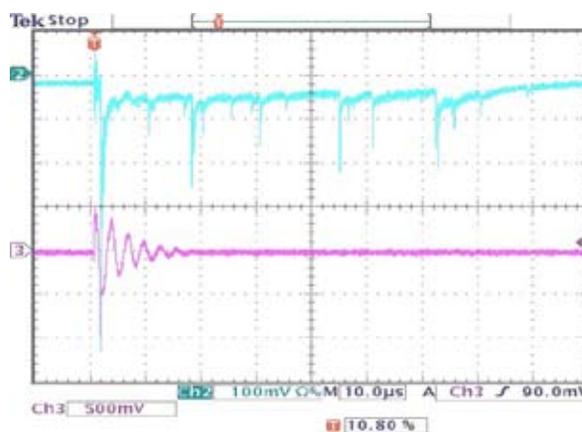
en un centellador-fotomultiplicador (SCFNT) capaz de discriminar sus energías dentro del rango 0.01-1 eV. Su

material de detección consiste básicamente en una matriz formada por un compuesto de litio (Li) enriquecido en un 95% con el isótopo ${}^6\text{Li}$, que es dispersado homogéneamente en un fino polvo de ZnS(Ag). Es ópticamente acoplado a un tubo fotomultiplicador de alta ganancia (10^5 a 1 kV de tensión de polarización) que contiene un fotocátodo de material bialcalino con respuesta espectral extendida desde 300 a 650 nm (máxima a 420 nm). El mecanismo de operación se funda en la alta sección eficaz de captura del ${}^6\text{Li}$ dentro del rango energético mencionado. La iluminación del fotocátodo ocurre vía la desexcitación del ${}^6\text{Li}$ producida vía emisión de partículas α , descrita por la reacción nuclear ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. La respuesta del SCFNT a los neutrones moderados, es registrada por medio de oscilogramas con barridos temporales (normalmente entre 10 y 100 μs) acorde con los tiempos de vuelo que son esperados para los emergentes del material moderador y cuyas velocidades, tal como han sido previamente estimadas, son típicamente del orden de 10^3 m/s. Como control de la efectiva producción de neutrones energéticos del dispositivo PF (variable aleatoriamente en intensidad disparo a disparo), se emplearon los otros dos detectores antes mencionados (SCF y CGM). En la Fig. 6 (a y b) se reproducen típicos oscilogramas de las señales que entrega el SCFNT, correspondientes a dos disparos que fueron registrados con barridos temporales de 20 y 10 μs , respectivamente, y en los cuales claramente se aprecia la distribución de picos asociados a neutrones moderados. Como criterio adoptado para estimar el espesor de PAD necesario para optimizar la producción de neutrones que emergen del material, se consideró el número máximo de picos que aparecen estadísticamente en los oscilogramas registrados en secuencias de varias series de descargas del PF. El mejor resultado encontrado se correspondió con un espesor de 24 mm.

En la Fig. 7 se muestra un oscilograma correspondiente a neutrones epitérmicos dentro del rango energético $25 \text{ meV} < E \leq 1 \text{ eV}$, obtenidos filtrando los emergentes del moderador a través de una placa de Cd de 2 mm de espesor, interpuesta entre éste y el detector. El Cd presenta un pico con un muy alto valor de sección eficaz de captura correspondiente a neutrones térmicos ($\sigma_c \approx 8000$ barns) que decrece abruptamente de manera casi lineal hasta $\sigma_c \approx 10$ barns, para energías de neutrones de 1eV.



(a)



(b)

Figura 6. Oscilogramas neutrones moderados (térmicos y epitérmicos) que emergen del moderador con energías dentro del rango energético 0.01-1 eV, registrados con dos barridos temporales: (a) 20 μs y (b) 10 μs .

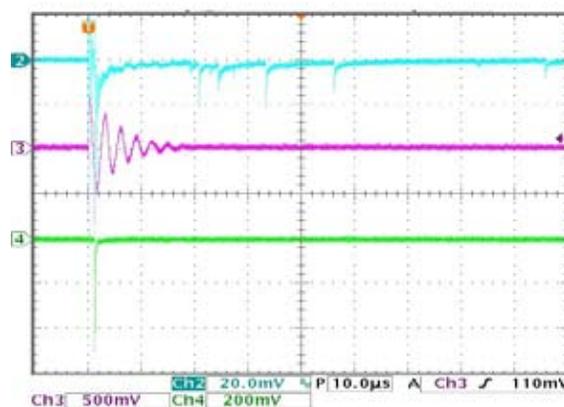


Figura 7. Oscilograma de neutrones epitérmicos dentro del rango de resolución energético del detector ($25 \text{ meV} < E \leq 1 \text{ eV}$) obtenidos interponiendo un filtro de Cd entre el moderador y el sistema de detección.

IV. APLICACIÓN AL MÉTODO DE ACTIVACIÓN NUCLEAR

Como una primera experiencia para demostrar la factibilidad de aplicación del dispositivo PF al método

de activación nuclear, se irradió Ag natural comercialmente disponible. En su composición isotópica este metal contiene una mezcla de ^{107}Ag y ^{109}Ag con abundancias relativas de 51.8 % y 48.2%, respectivamente. Las correspondientes reacciones nucleares originadas por captura son $^{107}\text{Ag}(n,\text{ev}\gamma)^{108}\text{Ag}$ y $^{109}\text{Ag}(n,\text{ev}\gamma)^{110}\text{Ag}$, siendo sus secciones eficaces para neutrones térmicos $\sigma_{n,\gamma}$ de 37 y 89 barns⁽⁹⁾ y sus vidas medias de decaimiento retardado (vía emisión gamma) de 2.42 min y 24.6 s, respectivamente. Las experiencias se realizaron empleando una lámina de 1 mm de espesor que se dispuso transversalmente al eje del dispositivo PF en su parte inferior (ver Fig.1) con el propósito de maximizar el flujo de neutrones energéticos de irradiación de acuerdo a la distribución angular mostrada en la Fig.3. La muestra se fijó detrás de una placa de PAD de 24 mm de espesor que, de acuerdo a los resultados obtenidos (Sec. III c), permiten maximizar la densidad de flujo de neutrones moderados que emergen del mismo. La radiación característica emitida por la muestra de Ag irradiada, se registró con un SD convencional para espectroscopía gamma basado en un cristal de NaI(Tl)-Fotomultiplicador de relativamente mediana resolución energética. La señales de corriente analógicas que entrega el mismo son amplificadas, digitalizadas y procesadas mediante un dispositivo analizador multicanal de altura de pulsos controlado por software. Básicamente, el analizador separa energéticamente y cuenta pulso a pulso la radiación detectada. En la Fig. 6 se reproduce el simple espectro de fotones registrado con sólo 7 disparos del dispositivo PF que se correspondió con una simple carga de gas (D_2) en su cámara de descarga y con un tiempo insumido de operación del mismo, entre el primer y último disparo, de aproximadamente 15 min. Como puede ser observado en la figura, el pico de 446.8 keV correspondiente al decaimiento del ^{110}Pb prevalece claramente sobre la estadística del fondo.

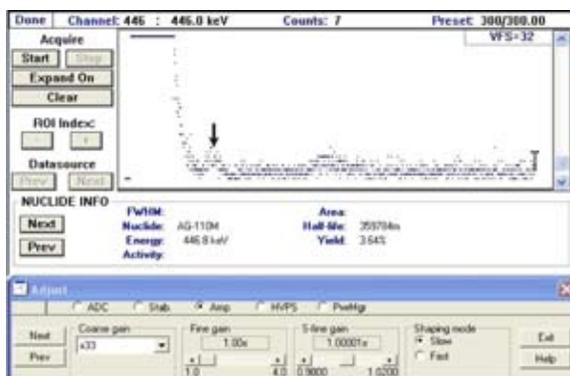


Figura 8. Espectro registrado irradiando una muestra de Ag natural con 7 disparos del dispositivo PF. La flecha señala el pico de energía de 446.8 keV correspondiente a fotones emitidos durante el decaimiento de ^{110}Ag .

V. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares presentados sugieren promisorias perspectivas de empleo de un dispositivo PF como fuente pulsada de neutrones para la determinación “in situ” de la composición química de sustancias mediante la técnica de activación nuclear. Desde un punto de vista comparativo con otras fuentes neutrónicas de uso corriente, constituye una herramienta con ventajas significativas, particularmente por constituir una fuente limpia (sin residuos radiactivos), fácilmente transportable y con alta seguridad operativa. La posibilidad de hacerlo funcionar en forma repetitiva (5 - 10 Hz) con la relativamente simple adaptación de un sistema de recirculación, enfriamiento y filtrado del gas de trabajo (D_2) capaz de eliminar las impurezas de iones (Cu, Si, O_2 , etc.) que normalmente se incorporan al mismo en las sucesivas descargas contaminándolo y probablemente afectando su funcionamiento en lo que hace a la reproducibilidad de la densidad de flujo de neutrones generado, disparo a disparo, reduciría considerablemente el tiempo insumido de irradiación y la consiguiente adquisición del espectro gamma emitido por las muestras para su rápida identificación.

REFERENCIAS

- 1 - S. M. Lombard, T.L. Isenhour, P.H. Heintz, G. L. Woodruff, W.E. Wilson, Int.J. Radiat. Isot. (1968), Vol.19, p.15.
- 2 - E. S. Gladney, E. T. Journey, D. B. Curtis, Anal. Chem. (1976), Vol.48, p.2139.
- 3 - E. T. Journey, D. B. Curtis, E. S Gladney, Anal. Chem. (1977), Vol.49, p.1741.
- 4 - E. S. Gladney, D. B. Curtis, E. T. Journey, J. Radional. Chem. (1978), Vol.96, p.299.
- 5 - E.M. Hussein, E. J. Walker, Appl. Radiat. Isot. Vol.53 (2000), pp.557
- 6 - B.C. Song, Y.J. Park, K.Y. Jee, Anal. Sci. Technol. Vol.16 (5), (2003), p.41.
- 7 - J. Mather, Phys. of Fluids, Vol.8, (1965) p.366.
- 8 - H. Bruzzone, M. Milanese, J. Niedbalski, H. Acuña, R. Moroso, L. Supán, S. Guichón, E. Malamud, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.38 (7), (2010), p.1592.
- 9 - R. Sher, Handbook on Nuclear Activation Cross Sections, IAEA, Vienna, (1974), STI/DOC/10/156.