

# Espectroscopía de la radiación x de alta energía emitida por un Plasma Focus de 4.7 kJ

## Hard x-ray spectroscopy of a 4.7 kJ Plasma Focus

Onnis L.<sup>1</sup>, Raspa V.<sup>2</sup>, Di Lorenzo F.<sup>2</sup>, y Knoblauch P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dto. de Física, FCEyN – UBA

<sup>2</sup> Laboratorio Plasma Focus, INFIP – CONICET, Dto. de Física, FCEyN – UBA

La distribución espectral de la radiación x de alta energía emitida por un Plasma Focus tipo Mather (30 kV, 10.5  $\mu$ F) fue determinada mediante el método de absorción diferencial en muestras metálicas de materiales y espesores diferentes. En el desarrollo de las mediciones cuyos resultados se presentan, el equipo fue operado empleando deuterio dosificado (en volumen) con 2.5 % de argón y 3.5 mbar de presión total. Se emplearon muestras de cobre, níquel, titanio y plata de espesores variables entre 0.1 y 10 mm, según el caso. La radiación x fue detectada mediante una película radiográfica comercial acoplada a un centellador del tipo Lanex (Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb). Los resultados indican la presencia de un pico dominante en la zona de los 85 keV y componentes espectrales relevantes que se extienden entre los 50 y 150 keV.

Palabras claves: Plasma Focus, rayos x duros, espectroscopía.

*The spectrum of the hard x-rays emitted by a Mather-type Plasma Focus device (30 kV, 10.5  $\mu$ F) was determined by means of the differential absorption method, using metallic samples of different thicknesses and compositions. The device was operated in deuterium doped with argon (2.5 % by volume) and the total filling pressure was 3.5 mbar. Copper, nickel, titanium and silver samples were employed, with thicknesses between 0.1 and 10 mm. The x-ray radiation was detected using commercial radiographic film coupled with a Lanex (Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb) intensifying screen. The results show the presence of a dominant peak in around 85 keV and significant spectral components between 50 and 150 keV.*

*Key Words: Plasma Focus, hard x-rays, spectroscopy*

### I. Introducción

Los pulsos de radiación x emitidos por dispositivos Plasma Focus han sido empleados para obtener radiografías desde al menos 1976<sup>1</sup>. Desde entonces tanto especímenes biológicos<sup>2,3</sup> como muestras pequeñas<sup>4,5,6,7</sup> fueron radiografiados usando dispositivos tipo Mather de baja energía como fuente de radiación. Otras contribuciones importantes consistieron en optimizar un dispositivo x-pinch para radiografiar con alta definición a una mosca<sup>8</sup> y obtener una radiografía por contraste de fase de una cápsula plástica como las usadas en experimentos de fusión por confinamiento inercial para contener al combustible<sup>9,10</sup>. En nuestro país, Bernal<sup>11</sup> reporta en 2000 el uso de un z-pinch de columna hueca operado en argón para obtener la radiografía de una mano. El contraste en la imagen permite distinguir el tejido blando de la estructura ósea. El mismo dispositivo fue empleado para radiografiar un circuito integrado.

A diferencia de los trabajos ya citados, donde se hace uso de las componentes de baja energía del espectro x ( $h\nu \sim 10$  keV), en 2000<sup>12</sup> se demuestra la posibilidad de obtener imágenes introspectivas de piezas metálicas empleando rayos x de energía elevada ( $h\nu \sim 100$  keV) emitidos por un Plasma Focus. La radiografía presentada en la figura 1, que corresponde a un mosquetón de escalador fabricado en una aleación de aluminio y que fue



Figura 1: Radiografía de un mosquetón de escalador fabricado en una aleación de aluminio.

tomada con una única exposición de 50 ns de duración, lo ejemplifica con nitidez. El contraste en la imagen permite distinguir distintos espesores del mismo material e identificar con claridad el resorte del mecanismo de cierre y dos ejes transversales. Ejemplos adicionales pueden encontrarse en la referencia 12.

Recientemente se utilizó un Plasma Focus como fuente de radiación pulsada (50 ns) para obtener radio-

grafías de objetos metálicos en movimiento rápido<sup>14</sup> y de piezas metálicas ocultas detrás de paredes de hierro de hasta 22 mm de espesor<sup>15</sup>. La distribución espectral de la radiación emitida por los Plasma Focus ha sido estudiada con gran detalle en el rango de los rayos x de baja energía, pero en la región de los 100 keV recibió comparativamente menos atención.

En la literatura existen antecedentes en cuanto a la caracterización espectral de la radiación x de alta energía emitida por un Plasma Focus utilizando filtros de Ross<sup>17,18,19</sup>, y emulsiones nucleares Ilford<sup>18,20</sup>. Los primeros resultaron adecuados para estudiar el espectro entre 5 y 67.4 keV pero su uso no es de trivial extensión al estudio de energías más elevadas; esencialmente debido a la dificultad de obtener materiales adecuados para fabricar filtros aptos fuera del rango citado. Las emulsiones Ilford, por el contrario, resultaron útiles para estudiar la región de mayor energía del espectro ( $\sim 150$  keV) pero fueron inadecuadas para estudiar las componentes espectrales de menor energía<sup>20</sup>.

La radiación que permitió obtener la radiografía ilustrada en la figura 1, fue caracterizada en 2007 mediante un espectro efectivo que presenta un único máximo en torno a los 60-80 keV y componentes espectrales relevantes entre 40 y 150 keV<sup>16</sup>.

En la presente comunicación se reporta la medición del espectro de rayos x de alta energía emitido por un Plasma Focus empleando el método de absorción diferencial en muestras metálicas.

## II. Dispositivo

Como fuente pulsada de radiación x de alta energía fue empleado un Plasma Focus tipo Mather de cámara compacta. El mismo cuenta con un banco de capacitores de 10.5  $\mu$ F operado a 30 kV (4.7 kJ de energía almacenada).

La cámara de descargas es cilíndrica y de 1 dm<sup>3</sup> de capacidad, su pared lateral es de acero inoxidable de 2 mm de espesor y cuenta con una conexión de vacío NW25. Dentro de la cámara se alojan los electrodos y el aislante. El ánodo es un tubo de cobre electrolítico de 2 mm de pared, 38 mm de diámetro externo y 85 mm de longitud. El cátodo está conformado por 12 barras de bronce de 3 mm de diámetro dispuestas equiespaciadamente sobre un anillo también de bronce de 76 mm de diámetro externo. En su base, los electrodos están separados por un aislante de vidrio Pyrex de 50 mm de diámetro externo, 4 mm de pared y 50 mm de longitud. La ventana de salida para la radiación x de interés, es un disco de acero inoxidable de 0.75 mm de espesor, que es a la vez la pared frontal de la cámara de descargas.

La figura 2 muestra una fotografía en la que pueden verse parte del banco de capacitores, la cámara de descargas y el arreglo experimental para la obtención de radiografías. Como detector de la radiación x se empleó un sistema película-pantalla Kodak, compuesto por película radiográfica de alta sensibilidad acoplada a un plástico centellador del tipo Lanex (Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb). La curva presentada en la figura 3 corresponde a la eficiencia

normalizada,  $\eta(E)$ , de conversión x a visible del plástico centellador, en función de la energía del fotón x incidente.



Figura 2: Disposición experimental.

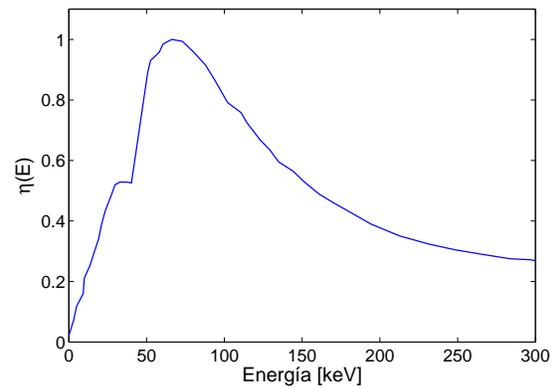


Figura 3: Eficiencia normalizada de la conversión x a visible como función de la energía del fotón x incidente

## III. Método de análisis espectral

El método que se formulará a continuación permite determinar el espectro de la radiación x de interés,  $S(E)$ , a partir del análisis de la atenuación que esta experimenta al atravesar muestras de diferentes metales y espesores. Para un espesor arbitrario  $d_j$ , puede definirse la transmisión  $T(d_j)$  de la siguiente manera

$$T(d_j) = \frac{I(d_j)}{I_0} = \frac{\int_0^\infty S(E)e^{-k(E)d_j}\eta(E)dE}{\int_0^\infty S(E)\eta(E)dE} \quad (1)$$

donde  $I_0$  e  $I(d_j)$  representan las intensidades incidente y transmitida, respectivamente. La expresión (1) considera que la intensidad de cada componente espectral decae exponencialmente en su interacción con la materia, y que dicho decaimiento está caracterizado por un coeficiente de atenuación lineal,  $k(E)$ , propio del material considerado. Dichos coeficientes se encuentran tabulados para una gran cantidad de sustancias puras y compuestas<sup>22</sup>. Tal como se adelantó,  $\eta(E)$  representa la respuesta espectral del

Material	Espesor [mm]	Cantidad	Paso [mm]
plata	0.10 a 0.80	8	0.10
titanio	0.89 a 9.79	11	0.89
cobre	0.20 a 3.00	15	0.20
níquel	0.15 a 3.00	20	0.15

Tabla 1: Detalle de las muestras empleadas.

plástico centellador que forma parte del sistema de detección de la radiación x.

Se empleó el método de regularización de orden cero<sup>23</sup> para determinar una función  $S(E)$  a partir de la ecuación (1) y los coeficientes de transmisión obtenidos experimentalmente para cada una de las muestras consideradas. El procedimiento experimental será descrito en la sección siguiente.

#### IV. Resultados experimentales

Se radiografió un conjunto de muestras de diferentes espesores de cobre, níquel, plata y titanio de calidad analítica. La tabla 1 indica la cantidad de muestras consideradas en cada caso, el rango en el que están comprendidos sus espesores y el incremento entre dos muestras sucesivas del mismo material. La figura 4 presenta la imagen digitalizada de una de las radiografías analizadas. Las muestras se encuentran agrupadas por material y están ordenadas en espesor decreciente de izquierda a derecha para los conjuntos que están dispuestos horizontalmente (cobre, níquel y titanio) y de arriba hacia abajo en el caso de las muestras de plata. Puede observarse que en la película se registran diferentes tonalidades. Las zonas más oscuras corresponden a regiones en donde la radiación incidió directamente, es decir sin atravesar ninguna muestra. Puede notarse también que la imagen del conjunto de muestras de un mismo metal presenta distintos tonos de forma tal que a espesores más finos les corresponde una imagen más oscura o equivalentemente, las muestras más gruesas resultan más absorbentes y en consecuencia generan una imagen más clara.

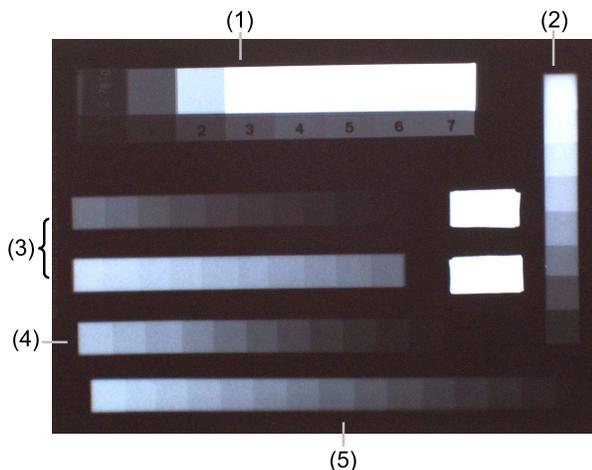


Figura 4: Imagen digitalizada de una de las radiografías analizadas. Ref: (1) patrón de calibración, (2) plata, (3) níquel, (4) titanio, (5) cobre.

La imagen ilustrada en la figura 4 fue tomada con una única exposición de la película, disponiendo el sistema película-pantalla inmediatamente después del arreglo de filtros y fijando el conjunto a 80 cm de la pared frontal de la cámara de descargas. El equipo fue operado en deuterio dosificado en volumen con un 2.5 % de argón, a una presión total de 3.50 mbar.

#### Procesamiento de las imágenes

Se utilizó un densitómetro de transmisión para medir la densidad óptica correspondiente a la imagen de cada una de las muestras empleadas. Un resultado representativo, correspondiente a la densidad óptica medida sobre la imagen de las muestras de cobre, se presenta en la figura 5.

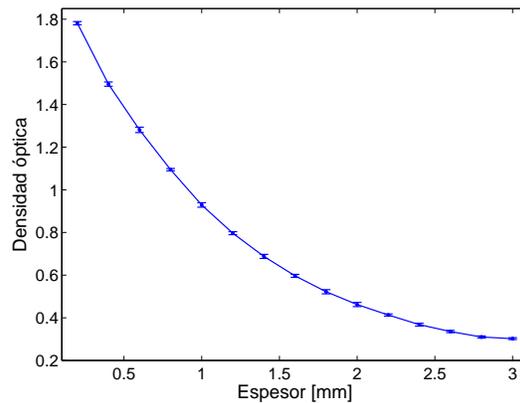


Figura 5: Densidad óptica medida sobre la imagen de las muestras de cobre.

#### Medición de la transmisión

Los coeficientes de transmisión,  $T(d_j)$ , fueron determinados experimentalmente para cada muestra a partir de la densidad óptica de su imagen. La calibración de la exposición de la película fue realizada mediante el análisis densitométrico de la imagen que puede observarse en la zona superior de la radiografía mostrada en la figura 4. Los valores experimentales de  $T(d_j)$  se obtuvieron interpolando la curva de calibración obtenida.

#### Determinación del espectro

En la figura 6 se presenta un espectro ilustrativo con sus bandas de error, obtenido experimentalmente mediante el método propuesto. El parámetro de regularización fue fijado en 0.5. Se puede observar que las componentes más importantes del espectro se hallan comprendidas entre 50 y 150 keV, presentando un único máximo en la zona de 85 keV. Los pequeños picos que se observan por debajo de los 50 keV se atribuyen a un artificio numérico vinculado con la regularización. Adicionalmente, se espera que las componentes espectrales de baja energía sean severamente atenuadas en la ventana de salida. Los resultados que se muestran en la figura 6 fueron obtenidos empleando el método Monte

Carlo<sup>23</sup>. Tanto los valores experimentales de  $T(d_j)$  como los espesores correspondientes, fueron perturbados aleatoriamente dentro de su intervalo de incerteza. El espectro reportado corresponde al promedio de 1000 realizaciones de Monte Carlo y las bandas de incerteza fueron calculadas a partir de la desviación standard del promedio.

Se analizaron diez radiografías obtenidas en idénticas condiciones experimentales, en todos los casos las características del espectro obtenido son consistentes con el resultado ilustrado en la figura 6.

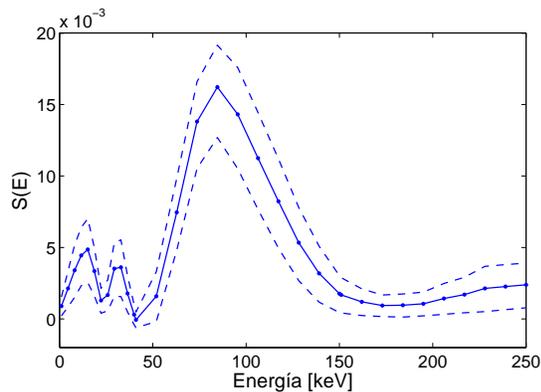


Figura 6: Espectro  $x$  de alta energía (línea sólida) con su banda de error (línea de trazos), obtenido con el método de análisis propuesto.

## V. Comentarios finales

La componente continua del espectro de rayos  $x$  duros emitidos por un Plasma Focus de 4.7 kJ, 30 kV, fue determinada analizando la atenuación que tal radiación experimenta al atravesar diversas muestras metálicas. El espectro obtenido exhibe componentes relevantes en la región 50-150 keV, que están dominadas por un único máximo ubicado en el rango 75-85 keV. Este espectro, que naturalmente difiere del que podría medirse dentro de la cámara de descargas, es el que interviene en aplicaciones tales como la ilustrada en la figura 1. Conocerlo, resulta beneficioso para proyectar nuevas aplicaciones de la radiación estudiada y para establecer una cota para la energía máxima de los electrones que son eyectados del foco.

Por otra parte los resultados obtenidos indican que, para el equipo empleado, la emisión disparo a disparo conserva sus características en cuanto a su espectro de alta energía.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en forma conjunta por la Universidad de Buenos Aires, (Proyecto UBA X810), CONICET y PLADEMA. Tres de los autores (V.R, P.K y F.D.L) son becarios doctorales de CONICET.

## Referencias

- 1 - Decker G. and Wienecke R., *Physica C*, **82**, 155, (1976).
- 2 - Castillo-Mejía F., Milanese M., Moroso R., Pouzo J. and Santiago M., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **29**, 921, (2001).

- 3 - Hussain S., Ahmad S., Khan M., Zakaullah M. and Waheed A., *J. Fusion Energy*, **22**, 195, (2003).
- 4 - Castillo F., Herrera J., Rangel J., Alfaro A., Maza M., Sakaguchi V., Espinosa G. and Golzarri J., *Braz. J. Phys.*, **32**, 3, (2002).
- 5 - Hussain S., Zakaullah M., Ali S., Bhatti S. and Waheed A., *Phys. Lett. A*, **319**, 181, (2003).
- 6 - Hussain S., Zakaullah M., Ali S. and Waheed A., *Plasma Sci. Technol.*, **6**, 2296, (2004).
- 7 - Hussain S., Shafiq M., Ahmad R., Waheed A. and Zakaullah M., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **14**, 61, (2005).
- 8 - Beg F., Krushelnick K., Lichtsteiner P., Meakins A., Kennedy A., Kajumba N., Burt G. and Dangor A., *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4602, (2003).
- 9 - Beg F., Stephens R., Shipton E., Hass D., Andreev G., Eddinger S. and Haung H., *AIP Conf. Proc.*, **808**, 125, (2006).
- 10 - Beg F., Stephens R., Xu H-W., Hass D., Eddinger S., Tynan G., Shipton E., DeBono B. and Wagshal K., *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 101502, (2006).
- 11 - Bernal L., Tesis Doctoral. Univ. Nac. de Mar del Plata (2000). Director: Bilbao L. Codirector: Bruzzone H.
- 12 - Moreno C., Clausse A., Martínez J., Llovera R., Tartaglione A., Vénere M., Barbuza R. and Del Fresno M., *AIP Conf. Proc.*, **563**, 300, (2000).
- 13 - Moreno C., Clausse A., Martínez J., Llovera R. and Tartaglione A., *Nukleonika*, **46**, S1 33, (2001).
- 14 - Raspa V., Sigaut L., Llovera R., Cobelli P., Knoblauch P., Vieytes R., Clausse A. and Moreno C., *Braz. J. Phys.*, **34**, 1696, (2004).
- 15 - Moreno C., Raspa V., Sigaut L., Vieytes R. and Clausse A., *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 091502, (2006).
- 16 - Raspa V., Moreno C., Sigaut L. and Clausse A., *J. Appl. Phys.*, **102**, 123303, (2007).
- 17 - Shafiq M. Hussain S., Waheed A. and Zakaullah M., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **12**, 199, (2003).
- 18 - van Paassen H., Vandre R. and White R., *Phys. Fluids*, **13**, 2606, (1970).
- 19 - Johnson D., *J. Appl. Phys.*, **45**, 1147, (1974).
- 20 - Lee J., Loebbaka D. and Roos C., *Plasma Phys.*, **13**, 347, (1971).
- 21 - Illerhaus B., Onel Y. and Goebbels J., *SPIE Proc.*, **5535**, 329, (2004).
- 22 - Hubbell J. and Seltzer S., *X-Rays Attenuation Coefficients*, NIST online at <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>
- 23 - Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A. and Vetterling W. T., *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, New York, Cambridge University Press, 1988