

# PROPIEDADES DE LA RADIACION X DE ALTA ENERGIA PRODUCIDA POR AUTOCOMPRESION DE PLASMA

Raspa V.D.<sup>1\*</sup>, Llovera R.<sup>1</sup>, Clause A.<sup>2</sup>, Moreno C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física FCEyN-UBA; PLADEMA-CNEA e INFIP-CONICET

<sup>2</sup>PLADEMA-CNEA-CONICET Y UNCPBA

email: moreno@df.uba.ar

*Se presentan las características relevantes de un equipo Plasma Focus de 4.7 kJ, 30 kV como fuente pulsada de Rayos X de alta energía. A partir de 4 experimentos diferentes, se demostró que la localización espacial de la fuente de radiación X de alta energía corresponde a la base del ánodo. Se exponen asimismo resultados acerca de la atenuación media de la radiación con la distancia de penetración y la estimación del espesor característico efectivo realizado sobre muestras de distintos metales. Se presentan además resultados experimentales que permiten inferir propiedades espectrales de las zonas de alta energía de la radiación emitida.*

*The relevant characteristics of a 4.7 kJ, 30 kV Plasma Focus device as a pulsed high-energy X-ray radiation source are presented. From 4 different experiments, it was demonstrated that the X-ray radiation source is located on the anode base. Results about the mean attenuation of the radiation with the penetration distance, and the effective characteristic thickness for several metallic samples are also shown. Experimental results that allow for inferring the spectral properties of the high energy region are also presented*

## I. INTRODUCCION

Se exponen a lo largo de este trabajo las características relevantes de un equipo Plasma Focus de 4.7 kJ, 30 kV<sup>[1]</sup>, como fuente pulsada de radiación X de alta energía que permite obtener imágenes introspectivas de objetos metálicos<sup>[2]</sup>. Asimismo se presentan resultados experimentales que demuestran que la localización espacial de la fuente de radiación de alta energía dentro de la cámara de descargas corresponde a la base del electrodo positivo, que en nuestro caso es un cilindro hueco, con su fondo ubicado a 10 cm de su extremo abierto. El equipo se opera con Deuterio a 4 mbar, renovándose el gas de llenado cada 10 disparos.

Las hipótesis de trabajo se correspondieron con la consideración de dos posibles ubicaciones para la fuente dentro de la cámara<sup>[3, 4]</sup>: el foco de plasma y la base del electrodo positivo. En ambas situaciones, la emisión se origina por bremsstrahlung como producto de la desaceleración de los electrones en el propio plasma durante la focalización, o por impacto de los mismos sobre el fondo del ánodo hueco, respectivamente.

Al irradiar un objeto, la radiación involucrada interactúa de diversas maneras con la materia que lo conforma. En primera aproximación puede considerarse que el decrecimiento relativo de la intensidad con la distancia de penetración es una constante que sólo depende del material y de la energía de la radiación incidente. Surge entonces la siguiente relación que expresa la intensidad de radiación de un haz monocromático en función de su distancia de penetración en la materia:

$$\frac{dI}{I} = -k \Rightarrow \frac{I}{I_0} = \exp(-kx) \quad (1)$$

donde  $I$  corresponde a la intensidad de radiación luego de atravesar un espesor  $x$  dentro de un material atenuante,  $k$  a la constante de atenuación e  $I_0$  a la intensidad incidente.

En los párrafos subsiguientes se desarrollan cuatro experimentos llevados a cabo para poder establecer la ubicación de la fuente dentro de la cámara a partir del análisis e interpretación de imágenes especialmente obtenidas para tal fin.

Asimismo, se exponen resultados acerca de la atenuación promedio de la radiación con la distancia de penetración, la estimación del espesor característico realizado sobre muestras de distintos metales y un valor representativo de la energía de los fotones emitidos por la fuente.

## II. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE EMISION

### Localización espacial de la fuente

Mediante triangulaciones realizadas utilizando imágenes obtenidas con parámetros geométricos prefijados, pudo localizarse la fuente dentro de la cámara. Para ello se montó el dispositivo esquematizado en la figura 1.

Como objeto a radiografiar se empleó un calibre de acero inoxidable con una apertura prefijada en  $(10.0 \pm 0.1)$  mm ubicado a  $(100.0 \pm 0.5)$  mm de la cámara. La distancia cámara - película, medida desde la superficie frontal exterior de la cámara, se fijó en  $(96.0 \pm 0.5)$  mm. El procedimiento de obtención de imágenes radiográficas fue detallado ya en la referencia [2].

Considerando las distancias consignadas en la figura 1 y que la medición realizada sobre la radiografía obtenida arrojó una longitud de  $(13.0 \pm 0.5)$  mm para la imagen de la apertura del calibre; se realizó una

\* Becaria de la Fundación Antorchas (Proyecto 14068-24).

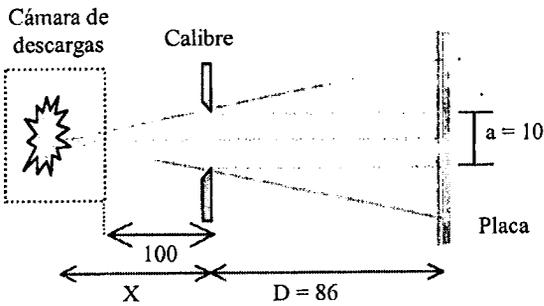


Figura 1. Vista superior de uno de los montajes empleados para determinar la ubicación de la fuente de radiación. Las distancias están expresadas en mm.

triangulación que estableció el valor de la distancia calibre - fuente en  $(287 \pm 12)$  mm. Este resultado implica que la fuente está ubicada en la base del electrodo positivo, y no en el foco de plasma. Triangulaciones similares realizadas con otras imágenes obtenidas empleando el dispositivo de la figura 1 arrojan resultados concordantes con el anterior.

Es conveniente señalar además, que la placa referida anteriormente resultó impresionada más intensamente en su zona central que en su periferia. Esto indicaría que dicha impresión fue producto de un haz de radiación colimado. Tal presunción es consistente con el resultado obtenido en cuanto a la posición de la fuente.

Para corroborar las afirmaciones anteriores, se realizó un montaje lateral como se esquematiza en la figura 2. Se colocó una película con su plano orientado verticalmente, paralelo al eje de la cámara de descargas, y a una distancia de  $(230 \pm 1)$  mm del mismo. Como obstáculo para la radiación se utilizó una varilla de bronce roscada (norma americana 3/8 - 16 NC), dispuesta con su eje en forma vertical, paralelo al plano de la película y centrado respecto de la misma. En la figura se han trazado la trayectoria de un rayo que se origina en la base del electrodo positivo e incide sobre la película después de atravesar el objeto, y la de uno análogo originado en el foco de plasma.

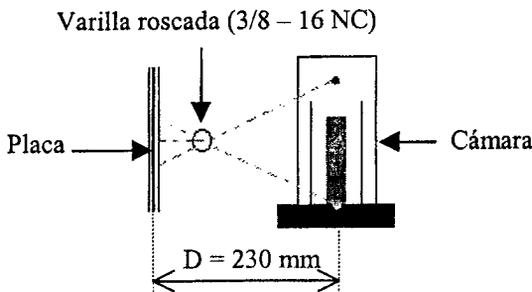


Figura 2. Esquema de la vista superior de un montaje lateral con una varilla roscada de bronce.

En cada una de las radiografías obtenidas empleando este montaje, la imagen de la varilla de bronce resultó ser única y desplazada respecto de la mitad de la película en

dirección al extremo libre de los electrodos. Este hecho, conjuntamente con que el ennegrecimiento de la película resultó gradual, siendo más intenso en las zonas cercanas a la base de los electrodos, respalda el resultado expuesto anteriormente.

Con el fin de lograr una tercera evidencia que permitiese asegurar que la radiación responsable de impresionar las películas se origina en la base del electrodo positivo, se implementó el montaje que muestra la figura 3. En este caso se emplearon 2 varillas similares a las anteriores, en una de las cuales se enroscaron tres tuercas de bronce separadas 40 mm entre sí, colocando la central a una altura coincidente con la del centro de la película.

La radiografía obtenida con este montaje exhibe en

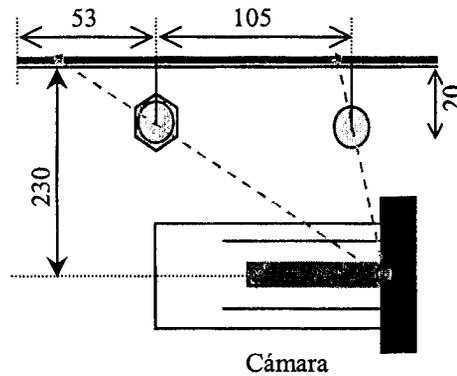


Figura 3. Esquema de la vista superior de un montaje lateral con dos varillas roscadas de bronce. Las distancias están expresadas en mm.

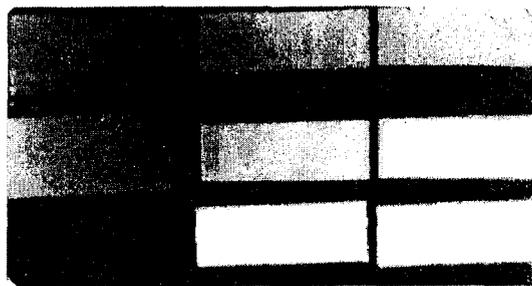
primer lugar, que la imagen de cada varilla es única, es decir que hubo una sola fuente de iluminación. En segundo lugar, indica que la imagen de la varilla sin tuercas no sufrió corrimiento significativo respecto de la proyección normal del objeto sobre la película; mientras que la imagen correspondiente a la varilla con tuercas presenta un desplazamiento de 15 mm respecto de su proyección normal sobre la película. Este hecho demuestra la veracidad de las afirmaciones anteriores acerca de que los rayos que impresionan la placa provienen de la base del electrodo central. Merece destacarse además que las imágenes de las tuercas extremas equidistan de la imagen de la tuerca central y que se localizan por arriba y por debajo, respectivamente, de las correspondientes proyecciones normales al plano de la película de sendas tuercas, lo cual sugiere que los rayos se originaron sobre el eje del electrodo central.

Como verificación adicional se colocó un obstáculo de bronce dentro del tubo que conforma el ánodo, ubicándolo a mitad de distancia entre ambos extremos y se repitió el experimento detallado en la figura 3. Esta vez, sendas imágenes de las varillas se vieron desplazadas respecto de sus proyecciones normales indicando que los rayos que lograron impresionar la película partieron en esta ocasión desde la posición del obstáculo.

El conjunto de estos cuatro experimentos nos permite afirmar que la fuente de radiación se localiza en la región donde un haz de electrones colimados generados durante la focalización del plasma choca con el fondo del ánodo.

## Atenuación de la radiación

Con un montaje similar al que muestra la figura 1 y utilizando láminas planas de distintos espesores de aluminio, cobre y bronce como objetos a radiografiar, se obtuvo la imagen que muestra la figura 4. La distancia cámara - película fue fijada en 300 mm y las piezas se adhirieron al portaplacas agrupadas según su material y en orden creciente para su espesor a partir del borde superior de la película. Los espesores, expresados en mm, fueron de 8.45 y 16.90 para el aluminio; 1.12, 2.24 y 3.36 para el cobre y 1.05, 2.10 y 3.15 para el bronce, medidos cada uno de ellos con una incerteza de 0.02 mm.



Aluminio Cobre Bronce

Figura 4. Imagen de las muestras utilizadas para analizar la atenuación de la radiación X.

La diferencia de tonalidades entre piezas del mismo material que muestra la figura 4, evidencia la atenuación de la intensidad de la radiación con la distancia de penetración en los materiales considerados.

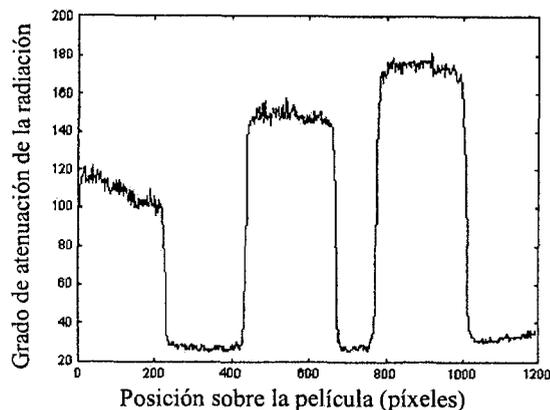
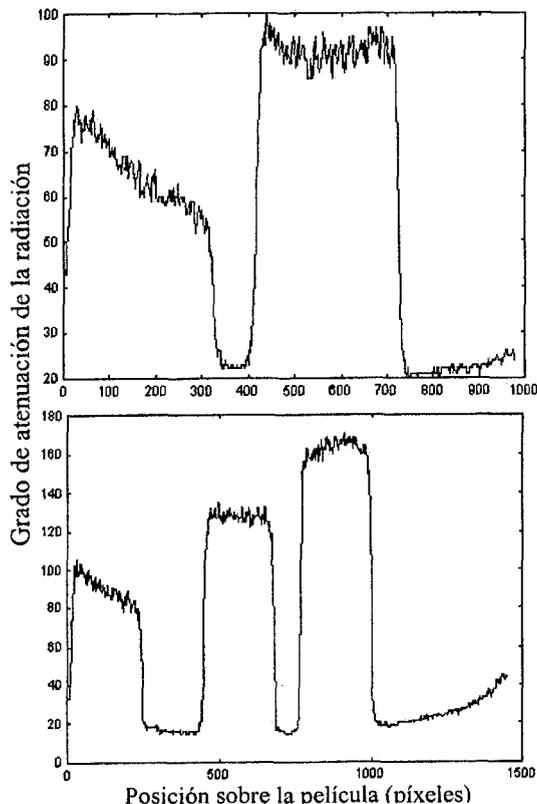


Figura 5. Perfiles de intensidad (a) Aluminio (b) Cobre (c) Bronce

Con el fin de obtener valores medios para el grado de atenuación de la emisión en función del espesor de la muestra, se realizó un promedio sobre distintas áreas de la imagen digitalizada de la figura 4. La selección de dichas zonas quedó determinada por la búsqueda de máxima uniformidad en la tonalidad de la imagen. Dado que la intensidad de radiación no es homogénea sobre toda la película, para lograr que los grados de atenuación correspondientes a las distintas muestras resulten magnitudes comparables, se los normalizó respecto del valor promedio de intensidad de fondo en zonas cercanas a aquellas sobre las cuales se realizó el promedio mencionado anteriormente.

En la figura 6 se ilustra una comparación entre los niveles de atenuación promedio en función del espesor de la muestra para los distintos materiales.

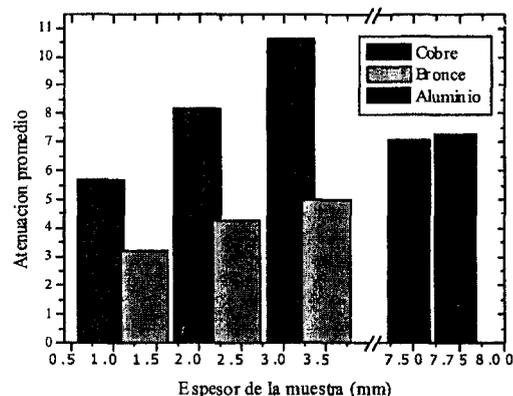


Figura 6. Comparación entre los niveles de atenuación promedio

Puede comprobarse que muestras de aluminio de mucho mayor espesor que de cobre logran una atenuación más leve. Asimismo para espesores comparables de bronce y cobre, este último logra una atenuación mucho mayor. Por lo tanto, de los materiales estudiados el cobre resulta el mejor atenuador.

## Estimación del factor de atenuación

Como fue expresado anteriormente, la ecuación (1) relaciona la intensidad de radiación monocromática en función de su distancia de penetración en la materia. Con el fin de estimar un factor de atenuación efectivo válido para cada uno de los materiales estudiados; se realizó

Procesando la imagen digitalizada que muestra la figura 4, se obtuvieron perfiles de intensidad para los distintos materiales. Las figuras 5.a, b y c muestran perfiles representativos para el aluminio, bronce y cobre, respectivamente.

para cada uno de ellos un ajuste en la ecuación (1), considerando los valores promedio obtenidos en la sección anterior. Los resultados obtenidos para el cobre y el bronce, respectivamente, fueron los siguientes:

$$k_C = (0.273 \pm 0.006) \text{ mm}^{-1}$$
$$k_B = (0.205 \pm 0.005) \text{ mm}^{-1}$$

Para este análisis se asignó el valor máximo en la discretización (255) al tono más claro de la imagen y el mínimo (0) al más oscuro.

Los resultados expuestos anteriormente, reafirman que del grupo de materiales estudiados es el cobre el que logra mayor atenuación. Puede describirse entonces al cobre y en menor medida al bronce como buenos atenuadores de este tipo de radiación, y por ende sugerírseles para el desarrollo de filtros y blindajes.

A pesar de que la radiación emitida por la fuente es policromática, partiendo de los valores de atenuación en un dado material puede estimarse un valor efectivo para la energía de la radiación incidente. En efecto, de las mediciones realizadas sobre las tres muestras de cobre de la figura 4 se obtiene un coeficiente de atenuación másico  $\mu/\rho$  [5] de  $(0.11 \pm 0.02) \text{ cm}^2/\text{g}$  que corresponde a una energía de 300 keV para los fotones involucrados.

### III. CONCLUSIONES

Mediante mediciones directas se ha demostrado que la radiación X de alta energía que atraviesa la pared frontal de la cámara de descargas (que es 3 mm de acero inoxidable), resulta útil para obtener imágenes introspectivas de objetos metálicos. Se encontró evidencia experimental de que el origen de esta radiación es la base del electrodo central y no el foco de plasma. Se ha encontrado también que el cobre es un buen candidato para ser empleado como blindaje de este tipo de radiación.

Siendo el ánodo de cobre y siendo este material un buen atenuador, puede afirmarse que se obtiene naturalmente una colimación del haz de salida hacia el frente del equipo dado por el propio ánodo, particularidad que puede resultar ventajosa para las aplicaciones. Para el

caso del equipo empleado, por ejemplo, el cono de iluminación directa tiene un semiancho de  $8.5^\circ$ . Debe remarcar, empero, que el efecto beneficioso respecto de la colimación del haz dificulta la interpretación de mediciones de anisotropía en la producción de rayos X duros. En efecto, registros de señales de fototubos o de cualquier otro detector sensible a esta radiación realizados, por ejemplo, a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  respecto del eje de simetría de los electrodos, no serían directamente comparables.

**Agradecimientos:** Este trabajo contó con el apoyo económico de la Fundación Antorchas (Proyecto 14068-24), de la IAEA (TC Proj. ARG1026-11099L), del PLADEMA y del CONICET (PIP 4523/96).

### Referencias

- [1] Moreno C, Martínez J, Bruzzone H y Clause A. Operación de un Plasma Focus de cámara compacta como generador de neutrones y radiaciones. *Anales Asociación Física Argentina*, **11**, 142-144, (1999).
- [2] Moreno C, Clause A, Vénere M, Martínez J, Barbuzza R, del Fresno M, Llovera R, Tartaglione A, y Jaroszewicz S. Imágenes introspectivas de objetos metálicos. *Anales Asociación Física Argentina*, **12**, 94-97, (2000).
- [3] Acuña H. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Mar del Plata, (2000).
- [4] Bernal L. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro, (2000).
- [5] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer X-Rays Attenuation Coefficients. Ionizing Radiation Division, Physics Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA. (1996).