

# ESTUDIO DE UN PLASMA FOCUS DE BAJA ENERGÍA COMO GENERADOR DE PULSOS DE RADIACIÓN X DE CORTA DURACIÓN OPERADO CON MEZCLAS DE H<sub>2</sub> Y Ar

P.J. Cobelli<sup>1</sup>, P.T. Knoblauch<sup>1</sup>, y C.H. Moreno<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Dto. de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires

<sup>2</sup> Laboratorio Plasma Focus - INFIP - CONICET y PLADEMA

e-mail: [cmoreno@focuslab.lfp.uba.ar](mailto:cmoreno@focuslab.lfp.uba.ar)

Los equipos Plasma Focus se utilizan como fuente pulsada de radiación X con aplicación inmediata en radiografías introspectivas de objetos metálicos. En la presente comunicación se presenta un estudio experimental de optimización de un equipo Plasma Focus tipo Mather, de 4.7 kJ, de cámara compacta, con interés en la generación de radiación X de alta energía. Se encontró que cuando se lo opera con 100 % H<sub>2</sub> no se obtiene una adecuada focalización pero con el agregado de una pequeña proporción de Ar (1 al 5 %) no sólo se mejora la focalización sino que también se hace posible la producción de radiación X con intensidad suficiente para realizar aplicaciones. Los resultados obtenidos permiten utilizar el mismo equipo para la generación de neutrones (si el gas empleado es deuterio) o bien como fuente de radiación X exclusivamente (si se emplea H<sub>2</sub> y Ar en mezcla), cambiando únicamente el gas de llenado.

Plasma Focus devices are employed as pulsed X-ray sources with immediate application to introspective radiographic imaging of metallic objects. An experimental study on the optimization of a compact chamber, Mather type, 4.7 kJ Plasma Focus device with interest in the generation of high energy X radiation is presented. It was found that, when operated with 100 % H<sub>2</sub>, focalization is inadequate, while the aggregate of small proportions of Ar (1 to 5 %) not only improves focalization but also produces X radiation intense enough to perform applications. The results of this study allow for the use of this device for neutron production (in case the filling gas is deuterium) as well as for X-ray generation solely (using admixtures of H<sub>2</sub> and Ar), only by changing the filling gas.

## I. INTRODUCCIÓN

El equipo GNI empleado en el presente estudio está compuesto por un banco de capacitores de 18×0.7 μF y una cámara de descargas compacta Plasma Focus tipo Mather<sup>(1)</sup>, operado a una tensión máxima de carga de 30 kV. En estas condiciones, la descarga eléctrica generada ioniza el gas de operación generando una lámina de plasma sobre la superficie del aislante<sup>(2)</sup> que evoluciona axialmente y finalmente se comprime y colapsa sobre sí misma en el eje de simetría de los electrodos. Durante esta etapa se producen cantidades substanciales de diversos tipos de radiación: rayos X (blandos y duros), haces de iones y de electrones; y, si se emplea deuterio, neutrones energéticos generados a partir de reacciones nucleares de fusión. El dispositivo GNI fue descrito detalladamente en una comunicación anterior<sup>(3)</sup>.

Desde el punto de vista de las aplicaciones tecnológicas, la emisión neutrónica puede emplearse para realizar neutrografías<sup>(4)</sup> y análisis de sustancias mediante métodos de activación neutrónica en situaciones inaccesibles a métodos tradicionales debido a su alto poder de penetración<sup>(5)</sup>. Recientemente se ha realizado un estudio de factibilidad y se ha presentado una técnica de detección de sustancias constituidas por elementos de bajo número másico (tales como agua y/o sustancias hidrogenadas) mediante la dispersión de neutrones rápidos<sup>(6, 12)</sup>.

Por otro lado, la generación de rayos X blandos tiene aplicación a la litografía, de relevancia en microe-

lectrónica<sup>(7)</sup>, o a la radiografía de pequeños especímenes biológicos<sup>(13, 14)</sup>; mientras que la emisión de radiación X dura está siendo empleada en aplicaciones radiográficas y tomográficas no convencionales, con especial interés en la introspección no invasiva de objetos metálicos<sup>(8)</sup>.

Según la aplicación, hay ocasiones en que es necesario disponer de la emisión de radiación X libre de neutrones, los cuáles podrían desencadenar procesos secundarios indeseados sobre la muestra irradiada. Las aplicaciones de índole médico y biológico constituyen ejemplos para los que el cumplimiento de esta condición resulta esencial.

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo la optimización de un equipo Plasma Focus (GNI) con interés en la generación de radiación X de alta energía apta para aplicaciones sin la emisión de neutrones. Dicha optimización debe entenderse como una maximización de la producción de rayos X duros dentro del espacio de parámetros de operación del equipo (gases de llenado, proporción de cada uno de los gases en mezcla y presión de operación) sin alterar el diseño de la cámara. En este sentido, cabe destacar que el diseño de este equipo ha sido optimizado para la producción de pulsos de neutrones de fusión, cuando se lo opera con deuterio o con mezclas de deuterio y argón.

## II. ESTUDIO EXPERIMENTAL

A fin de prescindir de la emisión de neutrones, se estudió el desempeño del equipo al ser operado tanto con hidrógeno puro como con mezclas de hidrógeno y argón.

\* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

En todos los casos, se empleó una bobina de Rogowski para sensar la derivada temporal de la corriente circulante hacia el ánodo ( $dI/dt$ ) a fin de registrar la presencia de focalización en la descarga. Complementariamente, se utilizó un plástico centellador NE102A acoplado ópticamente a un tubo fotomultiplicador, ubicado a 3.9 m de la cámara de descargas, para determinar la intensidad relativa de radiación X dura emitida. Ambas señales fueron registradas mediante un osciloscopio digitalizador de 500 MHz de ancho de banda analógica y una frecuencia máxima de muestreo de 1 Gs/s.

Para la obtención de imágenes radiográficas se utilizaron películas Curix ST-G2 AGFA, ubicadas a 40 cm del extremo frontal de la cámara de descargas. En base a experimentos previos, se determinó que la mínima amplitud de fotopico que debe presentar un pulso de emisión X para impresionar la placa radiográfica de trabajo es de aproximadamente 0.6 V; un disparo cuya amplitud de fotopico supere este umbral de sensibilidad dará lugar a una impresión nítida del film radiográfico.

Inicialmente se realizaron descargas empleando hidrógeno puro a presiones en el rango de 3 a 9 mbar. Sin embargo, en contraste con lo observado al operar el mismo equipo con deuterio<sup>(3, 9, 11)</sup>, en las descargas realizadas con hidrógeno puro no se registró emisión de radiación X dura ni focalización (colapso) de la lámina de corriente.

En segundo término se exploró el comportamiento del equipo con mezclas de hidrógeno y argón para presiones de llenado entre 4 y 7 mbar. Dado que la masa molecular del hidrógeno es aproximadamente 20 veces menor que la del argón, el agregado de una pequeña proporción de éste último resulta suficiente para generar un incremento significativo en la masa de la lámina de corriente. En particular, se emplearon presiones parciales de Ar del 1, 2.5 y 5 % respecto de las totales, correspondientes a fracciones de Ar en masa de 15, 35 y 50 %, respectivamente. En estos casos se observó focalización del plasma, acompañada por la emisión de radiación X dura.

La contribución dominante a la emisión de rayos X duros en el Plasma Focus se produce por bremsstrahlung debido a la colisión de haces de electrones energéticos, acelerados durante la focalización del plasma, sobre la base del ánodo (que de aquí en adelante llamaremos 'blanco'). Dado que la potencia irradiada en este proceso es proporcional al cuadrado del número atómico del material que compone el blanco, se dispuso un disco de plomo ( $Z_{Pb} = 82$ ) de 30 mm de espesor y 30 mm de diámetro sobre el blanco original de bronce ( $Z_{Cu} = 29$ ;  $Z_{Sn} = 50$ ) del GN1. De esta forma, el nuevo blanco se encuentra separado del extremo libre del electrodo central por una distancia mayor que el radio de éste, por lo que su presencia no afecta la dinámica del plasma en las etapas de compresión y focalización<sup>(10)</sup>.

Con esta configuración, se realizaron disparos con mezclas de hidrógeno y argón a presiones entre 4 y 6 mbar, con proporciones de argón en mezcla del 1, 2.5 y 5 %. Se observó focalización y emisión de radiación X de mayor intensidad que la registrada empleando blanco de bronce.

### III. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se analizaron definiendo 3 parámetros que caracterizan la producción de radiación X dura desde la perspectiva de su empleo en aplicaciones radiográficas:

- a. *Frecuencia de Emisión,  $f_E$* :  
Porcentaje de disparos con emisión de radiación X dura.
- b. *Frecuencia en Amplitud,  $a_E$* :  
Porcentaje de disparos con emisión de radiación X dura cuya intensidad supera el umbral de sensibilidad de la película radiográfica empleada.
- c. *Promedio de Fotopico,  $F_P$* :  
Promedio sobre los valores de amplitud del fotopico (en Volts) para todos los disparos en los que se registra emisión de radiación X dura.

La frecuencia de emisión determina la capacidad del equipo para generar focalizaciones que resulten en la emisión de radiación X dura. Asimismo, la frecuencia de amplitud es una medida de la eficiencia para producir disparos con intensidad X suficiente para impresionar una placa radiográfica. Además, a partir de la comparación de los valores de estos dos parámetros resulta posible distinguir regímenes de operación en los cuáles no se producen focalizaciones que den lugar a la emisión de rayos X, de aquellos en los que, si bien la focalización se alcanza en forma regular, la producción de radiación X resulta pobre. En último lugar, el tercer parámetro aporta información acerca de la calidad de la exposición de la placa radiográfica. En este sentido, un promedio de fotopico elevado respecto del umbral de sensibilidad de la película es indicativo de altos niveles de nitidez y contraste en la imagen radiográfica obtenida. Obsérvese que la frecuencia de amplitud y el promedio de fotopico resultan de fundamental importancia cuando se desea radiografiar un objeto en movimiento rápido<sup>(11)</sup>, sobre el cuál sólo es posible realizar una única exposición.

Las Figs. 1 y 2 muestran los resultados obtenidos para la frecuencia y amplitud de emisión, respectivamente, en función del porcentaje de Ar en mezcla con  $H_2$ . Las diferentes presiones de trabajo se señalan con símbolos: ( $\Delta$ ) 4 mbar, ( $\square$ ) 5 mbar, ( $\circ$ ) 6 mbar y ( $\diamond$ ) 7 mbar. Las líneas punteadas identifican la configuración de ánodo con blanco de bronce, mientras que con trazo continuo se denota la correspondiente a blanco de plomo.

La Fig. 1 permite concluir que, en líneas generales, el agregado de Ar beneficia la generación de radiación X dura. En particular, mientras que una serie de 10 disparos realizados con mezclas de Ar al 1 % V/V arroja entre 0 y 5 disparos con producción de radiación X, el empleo de mezclas de Ar al 5 % V/V tiende a producir un mínimo de 4 disparos con dichas características, y un máximo de 7.

En la Fig. 2 se observa que, en la totalidad de los casos estudiados, la amplitud de emisión aumenta conforme se incrementa el porcentaje de Ar en mezcla con  $H_2$ . Nuevamente observamos que una serie de 10 disparos con mezclas de Ar al 1 % V/V arroja como máximo 2 dispa-

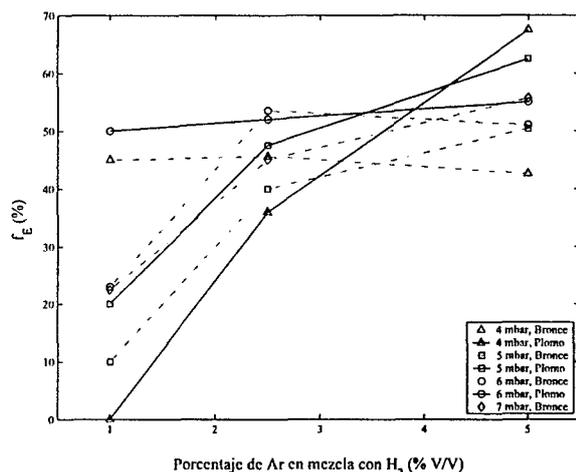


Figura 1. Frecuencia de emisión  $f_E$  en función de la proporción de Ar en mezcla con  $H_2$ . Las diferentes presiones de trabajo se señalan con símbolos: ( $\Delta$ ) 4 mbar, ( $\square$ ) 5 mbar, ( $\circ$ ) 6 mbar y ( $\diamond$ ) 7 mbar. Líneas punteadas identifican la configuración de ánodo con blanco de bronce, mientras que con trazo continuo se denota la correspondiente a blanco de plomo.

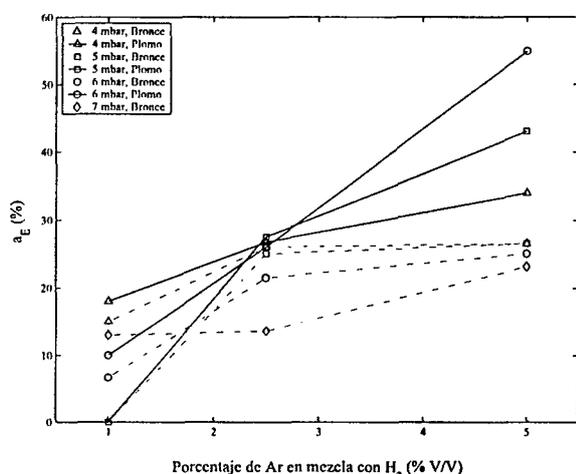


Figura 2. Amplitud de emisión  $a_E$  en función de la proporción de Ar en mezcla con  $H_2$ . Las diferentes presiones de trabajo se señalan con símbolos: ( $\Delta$ ) 4 mbar, ( $\square$ ) 5 mbar, ( $\circ$ ) 6 mbar y ( $\diamond$ ) 7 mbar. Líneas punteadas identifican la configuración de ánodo con blanco de bronce; trazo continuo denota la correspondiente a blanco de plomo.

ros con intensidad X suficiente para impresionar una placa radiográfica, mientras que el empleo de mezclas de Ar al 5% V/V asegura entre 2 y 5 disparos de esas características.

Asimismo, la Fig. 2 revela una tendencia que establece en forma concluyente el efecto que el material en la base del ánodo tiene sobre la generación de radiación X de interés radiográfico: dada una presión de trabajo, la amplitud de emisión con blanco de plomo es siempre superior a la correspondiente con blanco de bronce. La presencia del blanco de plomo aumenta la cantidad de disparos con emisión de radiación X apta para las aplicaciones radiográficas de interés.

Por otro lado, la Fig. 3 presenta los promedios de fotopicos junto con su dispersión (ambos en V) en función de la proporción de Ar en mezcla con  $H_2$ . Cada fila representa los valores obtenidos para una misma presión de trabajo empleando blanco de bronce (columna izquierda) y blanco de plomo (columna derecha). Los paneles superior, central e inferior corresponden a presiones de llenado de 4, 5 y 6 mbar, respectivamente. Se observa que, para proporciones de Ar en mezcla del 2.5 y 5% V/V, la presencia del blanco de plomo incrementa el valor promedio de los fotopicos.

Un análisis adecuado de estos gráficos requiere considerar en forma conjunta los resultados obtenidos para cada uno de los 3 parámetros mencionados. Empleando un blanco de bronce se observa que, de las presiones y porcentajes de mezcla estudiados, la combinación que optimiza tanto la frecuencia de emisión como la frecuencia de amplitud y promedio de fotopico, es la que corresponde a presiones de 4 y 5 mbar con 2.5% de Ar. Ambas combinaciones aseguran una impresión en la placa radiográfica.

En cambio, utilizando plomo como blanco, se observa que sin importar la presión de llenado (dentro del rango estudiado), una proporción de 5% de Ar maximiza tanto la frecuencia de emisión como la de amplitud. En particular, vemos que una presión de llenado de 6 mbar asegura la mayor emisión de radiación X dura, con un fotopico promedio de  $(1.2 \pm 0.3)$  V, lo que garantiza una impresión de alta calidad en la película, con un solo disparo.

#### IV. CONCLUSIONES

El equipo PF empleado en este trabajo no produce radiación X, ni focalización adecuada cuando se lo opera con  $H_2$  puro. Sin embargo, operado con mezclas de  $H_2$  y Ar produce buenas focalizaciones y emisión de radiación X dura apta para aplicaciones radiográficas.

La no focalización con  $H_2$  puro es atribuible a procesos de ruptura dieléctrica y evolución cinemática deficientes, dado que el equipo está diseñado para operar con  $D_2$ . El agregado de Ar, al incrementar el peso molecular relativo, facilita la cinemática y el colapso del plasma, aumentando la regularidad del equipo en la generación de radiación X dura.

La presencia de un blanco de plomo mejora la emisión de rayos X, obteniéndose mayor intensidad de radiación. De esta forma, el empleo de un blanco de plomo permite obtener radiografías de objetos más distantes de la cámara, ganando uniformidad en la exposición realizada.

Para este equipo es recomendable emplear  $H_2+2.5\%$  Ar para presiones de llenado de 4 y 5 mbar (sin plomo). Con blanco de plomo, encontramos que proporciones de  $H_2+5\%$  Ar son recomendables, especialmente para una presión de llenado de 6 mbar (con plomo).

En resumen, el presente trabajo demostró que es posible operar un equipo optimizado para la producción de neutrones con deuterio (GN1), de modo tal que emita radiación X dura apta para aplicaciones, sin emisión de neutrones. Los estudios realizados con distintas proporciones de argón en hidrógeno permitieron encontrar el conjunto de parámetros que optimiza el rendimiento del equipo tanto en frecuencia de amplitud como en intensidad de emisión de

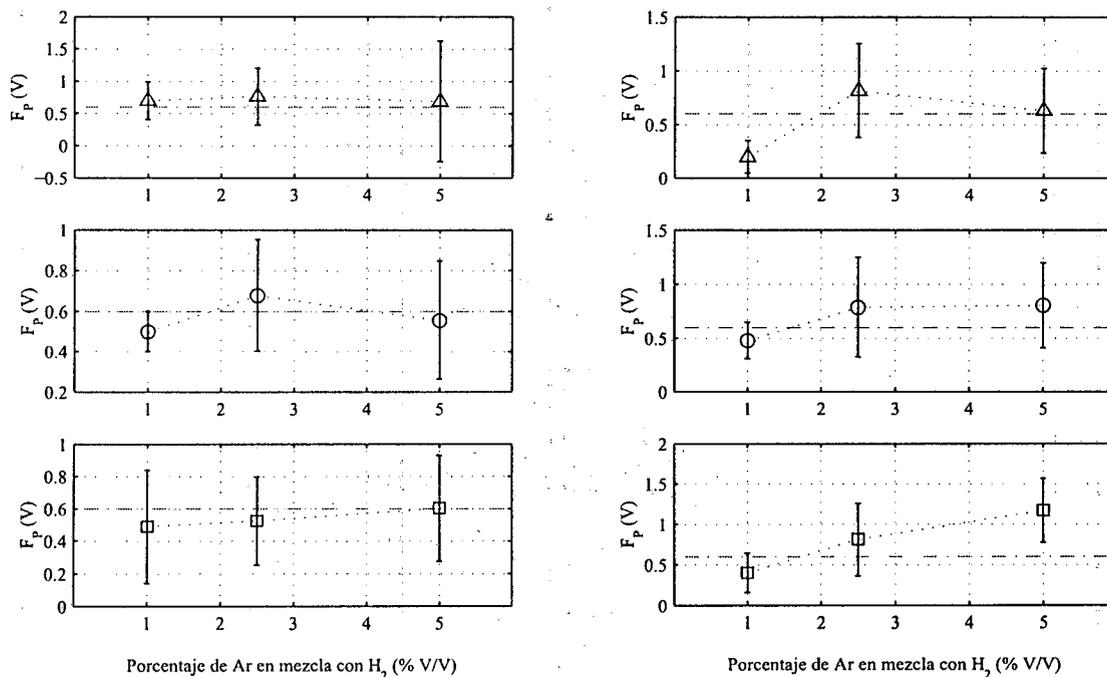


Figura 3. Promedios de fotopicos y su dispersión (en V) en función de la proporción de Ar en mezcla con  $H_2$ , para las diferentes presiones de llenado empleadas.

radiación X dura. Se mostró además que la presencia de blancos de materiales con número atómico elevado en la base del ánodo beneficia la emisión de radiación X dura.

### Agradecimientos

El presente trabajo contó con apoyo económico de la IAEA (TC Proj. ARG1026-11099L), del PLADEMA- CNEA y de la UBA (X074).

### Referencias

- 1 - J.W. Mather, *Phys. Fluids*, **8**, 366 (1965).
- 2 - H. Bruzzone and R. Vieytes, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **35** (12), pp. 1745-1754 (1993).
- 3 - C. Moreno, J. Martínez, H. Bruzzone y A. Clausse, *Anales AFA*, **11**, pp. 142-144 (1999).
- 4 - M. Gibbons, W. Richards and K. Shields, *LLNL Rep UCRL-JC-129723* (1998).
- 5 - F. Brooks, A. Buffler, M. Allie, K. Bharuth-Ram, M. Nchodu and B. Simpson. *Nuclear Instruments and Methods, Sect. A*, (410), **2**, 319-328 (1998).
- 6 - C. Moreno, A. Clausse, J. Martínez, R. Llovera, A. Tartaglione, M. Vénere, R. Barbusza and M. del Fresno. *AIP Conf. Proc.*, **563**, 300-305 (2001).
- 7 - S. Lee, P. Lee, G. Zhang, X. Feng, V. Gribkov, M. Liu, A. Serban and T. Wong. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **26** (4), 1119-1126 (1998).
- 8 - C. Moreno, A. Clausse, J. Martínez, R. Llovera and A. Tartaglione. *Nukleonika*, **26** (1), 33-34 (2001).
- 9 - C. Moreno, H. Bruzzone, J. Martínez and A. Clausse. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **28** (5), 1735-1741 (2000).
- 10 - S. Lee, M. A. Alabraba, A. V. Gholap, S. Kumar, K. H. Kwek, Mohammad Nisar, R. S. Rawat and J. Singh. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **18**, No. 6 (1990).
- 11 - V. Raspa. Tesis de Licenciatura, Depto. de Física, FCEyN, UBA (2003).
- 12 - J. Pouzo, M. Milanese, and R. Moroso. *AIP Conf. Proc.*, **669**, 277-280 (2003).
- 13 - G. Decker and R. Wienecke. *Physica*, **82 C**, 155-164 (1976).
- 14 - F. Castillo, M. Milanese, R. Moroso, J. Pouzo and M. Santiago. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, **29** (6), 921-926 (2001).