

## Estudio de la dinámica de una lámina de corriente en un plasma focus operado con mezclas de gases mediante sondas magnéticas

Knoblauch P.<sup>1\*</sup>, Isturiz G.<sup>2</sup>, López Arrieta L.<sup>2</sup>, Giménez Molinelli P.<sup>2</sup>, Cobelli P.<sup>2</sup>, Lazarte A. I.<sup>1</sup>, y Di Lorenzo F. J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Becario Doctoral CONICET - Depto. de Física FCEyN, UBA, INFIP-CONICET, PLADEMA

<sup>2</sup> Depto. de Física FCEyN, UBA, INFIP-CONICET, PLADEMA

<http://focuslab.lfp.uba.ar>

e-mail to: pknoblauch@focuslab.lfp.uba.ar

Se estudió experimentalmente, mediante una sonda magnética inductiva, la dinámica de una lámina de corriente en un equipo plasma focus de 1,1 kJ. La descarga eléctrica se realizó en mezclas de hidrógeno y argón, a presiones entre 5 y 10 mbar. A partir de la señal inducida en la sonda magnética, se determinaron el ancho temporal de la lámina de corriente y su instante de arribo a la posición de la bobina. Se presentan la cinemática de la lámina y la evolución de su ancho durante la etapa axial de la descarga. Estos resultados se comparan con los correspondientes a los gases puros en las mismas condiciones experimentales.

*By means of an inductive magnetic coil, the dynamics of the current sheath in a 1.1 kJ plasma focus is experimentally studied. The device is operated with a mixture of hydrogen and argon as filling gas at pressures between 5 to 10 mbar. The arrival time of the current sheath to different axial positions as well as its temporal width are inferred from the induced magnetic coil signals. The kinematics of the sheath and the evolution of its width during the axial stage are presented. These results are compared to those obtained with pure gases in the same operating conditions.*

### I. Introducción

Los Plasma Focus (PF) son dispositivos en los que se realizan descargas eléctricas de alta potencia en gases a presiones del orden del milibar. Durante la descarga se produce entre los electrodos una lámina de corriente, que evoluciona hasta alcanzar el extremo libre de los electrodos. Allí, el plasma se comprime (focalización) generando diversos procesos que resultan en la emisión de distintos tipos de radiación y haces de partículas. Uno de los posibles usos de los PF con potencial importancia para la industria es como fuente pulsada, ya sea de radiación x de alta energía o, en el caso de emplear deuterio o una mezcla de deuterio-tritio, de neutrones de fusión nuclear (1–4).

Recientemente se ha mostrado que en determinadas condiciones de operación, el agregado de una pequeña cantidad de argón tanto a hidrógeno como a deuterio favorece la focalización de estos equipos, así como también al número de focalizaciones respecto al número de descargas (5). Además, este agregado incrementa la emisión tanto de radiación x (6) como neutrones (7).

La dinámica de una lámina de corriente en un dispositivo PF operado con distintos gases, tales como hidrógeno, deuterio, argón, nitrógeno y aire, ha sido extensamente estudiada mediante sondas magnéticas inductivas (8; 9), así como por métodos ópticos (10). Asimismo diversos modelos teóricos han sido propuestos para describir su estructura interna (11–13).

Debido a los resultados experimentales obtenidos con mezclas de argón e hidrógeno y en vista de lograr optimizar un PF como fuente de radiación, resul-

ta importante el estudio de la dinámica de la lámina de corriente, en las etapas previas a la focalización, cuando se emplean mezclas de gases. Un estudio comparativo entre gases puros y aire puede encontrarse en el trabajo de J. Pouzo (8).

El estudio experimental que se presenta en este trabajo se realiza con sondas magnéticas que, por su reducido tamaño, no perturban significativamente la distribución de corriente en la lámina. A continuación, se hará una breve descripción del dispositivo empleado y de las mediciones realizadas. Finalmente se mostrará que si bien la dinámica de la lámina de corriente en los gases puros y en mezclas con una pequeña proporción de argón son globalmente similares entre sí, presentan estructuras internas con marcadas diferencias.

### II. Dispositivo Experimental

El estudio se llevó a cabo en un equipo PF tipo Mather de 1,1 kJ (5,6  $\mu$ F y 20 kV). La variación temporal de la corriente de descarga fue registrada con una bobina de Rogowski, resultando una corriente total máxima de  $\sim 100$  kA alcanzándose  $\sim 1,7$   $\mu$ s después de iniciada de la descarga.

Las descargas se realizaron llenando una cámara de descargas de vidrio Pyrex, con mezclas de argón al 2,5, 5 y 20% en hidrógeno en el rango de presiones comprendido entre 5 y 10 mbar. El llenado de la cámara, tanto para los gases de alta pureza ( $>99,99\%$ ) como para las mezclas empleadas, se realiza en dos etapas: se transfieren los gases a un recipiente hasta una presión máxima de 100 mbar, y luego se traspasan a la cámara de descargas. La presión en el interior de ésta se mide con un manómetro capacitivo de 0,01 a 10 mbar.

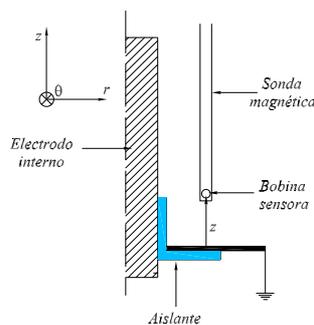
\*Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

El electrodo interno, que actúa como ánodo de la descarga, es de cobre macizo de  $\sim 9,5$  mm de diámetro y 10,5 cm de longitud. Éste se encuentra separado de la base de la cámara de descargas, que actúa como cátodo, por medio de un aislante de vidrio Pyrex montado en un soporte de Nylon.

La sonda magnética empleada consiste en un conjunto de 50 espiras de  $\sim 1$  mm de diámetro cuya área total efectiva es de  $(44,64 \pm 1,14)$  mm<sup>2</sup>. El bobinado se coloca en un tubo de vidrio Pyrex de  $(3,1 \pm 0,1)$  mm de radio externo con uno de sus extremos cerrado.

La cámara se encuentra acondicionada de manera tal que es posible introducir esta sonda en forma paralela al electrodo central, orientada de modo que la normal del conjunto de espiras se ubique en la misma dirección que la componente azimutal del campo magnético.

En la figura 1 se muestra un corte esquemático del interior de la cámara de descargas, indicando la disposición de la sonda relativa al electrodo y la orientación del sistema de coordenadas.



**Figura 1.** Esquema del interior de la cámara de descargas.

Las mediciones se realizaron registrando el paso de la lámina de corriente por la posición de la sonda magnética, que se encuentra ubicada a una distancia radial fija de 16 mm (medida desde el eje del electrodo interno), y a una posición axial ( $z$ ) que puede regularse con un precisión de 1 mm. La coordenada  $z$  se varió entre 2 y 8 cm medida desde la base de la cámara, en pasos de 2 cm.

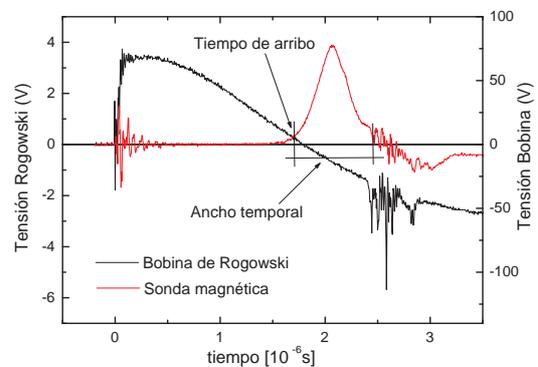
Se estudió, además, la emisión de radiación x mediante un centellador NE102A adosado ópticamente a un fototubo polarizado a 800 V. El conjunto se colocó en el interior de una jaula de Faraday para evitar el ruido electromagnético propio de la descarga, con su eje de simetría perpendicular al eje del electrodo, alineado con su extremo y a aproximadamente 90 cm de éste.

### III. Mediciones

Para estudiar la cinemática y estructura de la lámina de corriente a partir de las señales de sonda magnética, se fue variando, de forma sistemática, la concentración de argón en hidrógeno, la posición axial de la sonda y la presión de llenado. Se registraron un

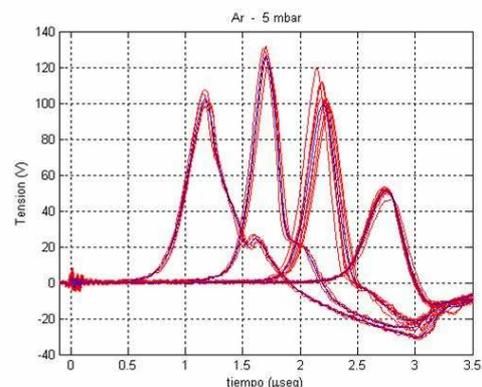
total de 10 señales de sonda por cada condición experimental analizada.

Se presentan en la figura 2 las señales típicas registradas por la bobina de Rogowski y por la sonda magnética ubicada en  $z = 6$  cm, con una presión de 5 mbar de argón. En la señal registrada por la bobina de Rogowski se aprecian variaciones bruscas a  $\sim 2,5$   $\mu$ s luego de iniciada la descarga. Estas variaciones corresponden a la focalización de la lámina de corriente en el extremo libre del electrodo interno. La tensión inducida en la sonda presenta una forma aproximadamente triangular que se corresponde con el paso de la lámina por la posición de la espira sensora. En la señal de la sonda, también se observan oscilaciones de alta frecuencia (en un entorno de los 2,5  $\mu$ s) coincidentes temporalmente con la focalización de la lámina señalada en la bobina de Rogowski.



**Figura 2.** Tensión inducida en la bobina en Rogowski y en la sonda magnética ubicada en una posición  $z = 6$  cm en 5 mbar de argón.

Se definen, como se muestra en la figura 2, el tiempo de arribo de la lámina a la posición de la espira como el instante en que se alcanza el 10% del máximo de la señal de la sonda; y el ancho temporal de la lámina de corriente como el ancho de la señal medida al 10% de su máximo. De esta forma, el tiempo de arribo corresponde a la llegada del frente de la región portadora de corriente a la posición de la sonda magnética.

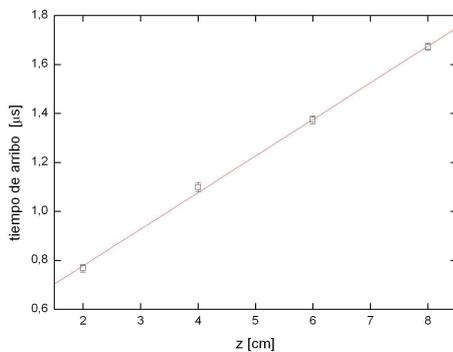


**Figura 3.** Tensión inducida en la sonda magnética ubicada en las posiciones  $z = 2, 4, 6$  y 8 cm (de izquierda a derecha), empleando una mezcla de 5% de argón en hidrógeno.

En la figura 3 se muestra el conjunto de 10 mediciones de señales de sonda magnética, para 4 posiciones axiales de la sonda. Debido a la reproducibilidad observada en las señales se mostrará, de aquí en más, únicamente el promedio correspondiente a cada serie.

#### IV. Resultados Experimentales

Los tiempos de arribo de la lámina a la sonda presentan, en todos los casos estudiados, una tendencia lineal con la posición de la sonda. En la figura 4 se muestra un gráfico de este tiempo en función de la posición de la sonda para una presión de 7,5 mbar empleando una mezcla al 2,5 % de argón. Los datos representan el promedio de las 10 mediciones realizadas en cada condición experimental y las respectivas incertezas experimentales se corresponden con una desviación estándar muestral de los datos.



**Figura 4.** Tiempo de arribo en función de la posición de la sonda a una presión de 7,5 mbar empleando una mezcla de 2,5 % de argón en hidrógeno.

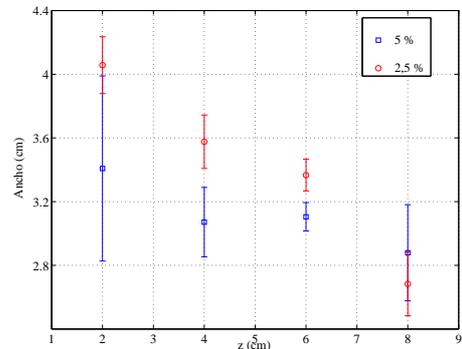
Basándose en esta tendencia, se determinó a partir de la pendiente del ajuste lineal de los datos mostrados en la figura 4, la velocidad media del frente de la región portadora de corriente de la lámina. Las velocidades así estimadas para las condiciones ensayadas son consignadas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Velocidades medias estimadas para el frente de la lámina de corriente, obtenidas de un ajuste lineal de los tiempos de arribo en función de la posición de la sonda.

Gas	presión [mbar]	velocidad [ $\text{cm}/\mu\text{s}$ ]
hidrógeno	5	$7,2 \pm 0,2$
	10	$6,8 \pm 0,3$
argón	5	$4,0 \pm 0,1$
	10	$3,1 \pm 0,1$
argón al 2,5 %	5	$7,1 \pm 0,2$
	10	$7,2 \pm 0,2$
argón al 5 %	5	$7,2 \pm 0,2$
	10	$7,3 \pm 0,2$

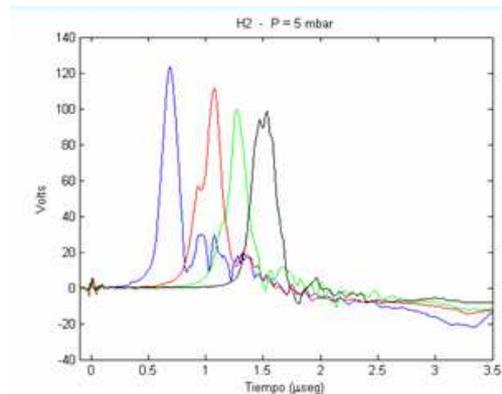
Por otro lado, se estimaron los anchos espaciales de la lámina considerando constante la velocidad de tránsito de ésta por la posición de la sonda. En la figura 5 se muestran los anchos medidos para descargas a

10 mbar con mezclas al 2,5 % y 5 %. Estos anchos resultaron estar comprendidos entre 2 y 4 cm tanto para los gases puros como para las mezclas estudiadas.

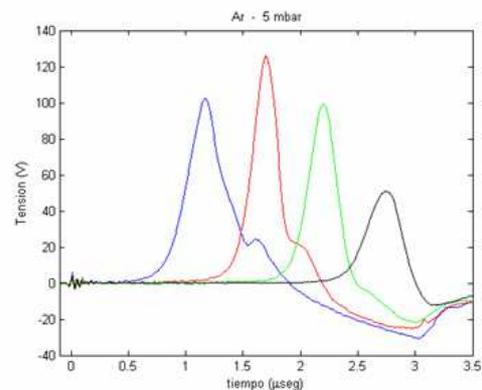


**Figura 5.** Anchos de la lámina corriente a una presión de 10 mbar con una mezcla al 2,5 y 5 %.

En las figuras 6a y 6b se presentan las señales de sonda obtenidas a una presión de 5 mbar, cuando el gas de llenado fue hidrógeno y argón respectivamente.



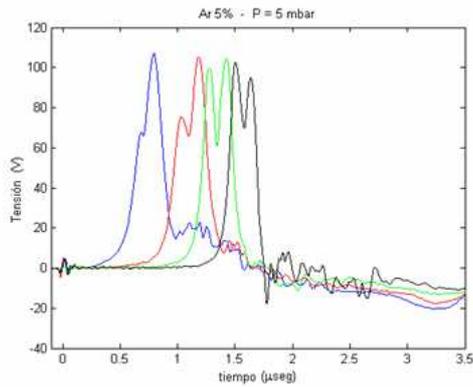
(a) 5 mbar en hidrógeno.



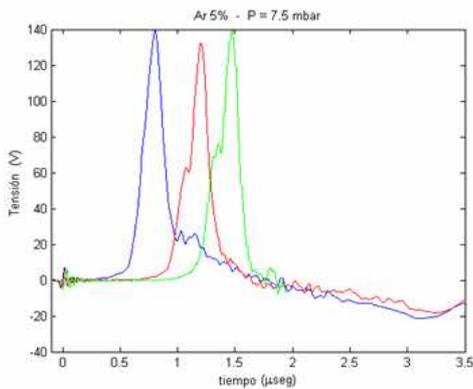
(b) 5 mbar en argón.

**Figura 6.** Señales de sonda magnética en gases puros de izquierda a derecha para  $z = 2, 4, 6$  y  $8$  cm.

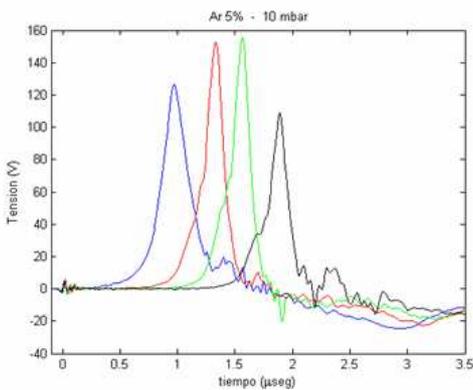
Adicionalmente, en las figuras 7a, 7b y 7c se muestran las correspondientes señales de sondas obtenidas a presiones de 5, 7,5 y 10 mbar en una mezcla al 5 %.



(a) 5 mbar, 5 % de argón en hidrógeno.



(b) 7,5 mbar, 5 % de argón en hidrógeno.

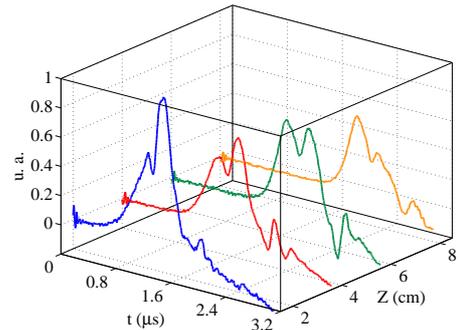


(c) 10 mbar, 5 % de argón en hidrógeno.

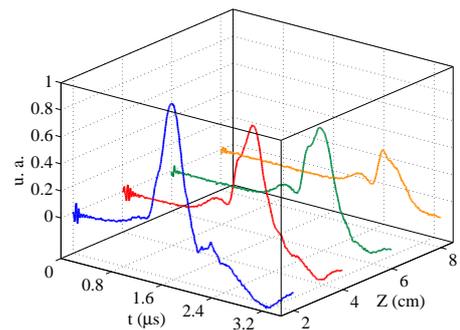
**Figura 7.** Señales de sonda magnética con mezcla de gases de izquierda a derecha para  $z = 2, 4, 6$  y  $8$  cm.

Se puede visualizar que en las señal de sonda registradas con gases puros aparece un *hombro*, presente en el flanco decreciente para argón (ver figura 6b) mientras que para hidrógeno se observa en el flanco creciente (ver figura 6a). Este *hombro* se torna menos importante a medida que la lámina avanza por el cañón. Cuando se emplea una mezcla al 5 % y a una presión de 5 mbar, se aprecia que el *hombro* aparece únicamente en el flanco creciente y se va transformado, mientras avanza la lámina, en un pico comparable con el pico original de la señal (ver figura 7a). A medida que aumenta la presión de llenado, manteniendo constante la proporción de los gases (ver figuras 7b y 7c), este *hombro* cambia su forma y tamaño.

Por otra parte, se estudió la cantidad de veces que se obtiene una focalización respecto a la cantidad de descargas para distintas condiciones de operación. Se encontró evidencia de que el agregado de un 20 % de argón produce focalizaciones en un 70 % de los casos para presiones de trabajo entre los 5 y 8 mbar, siendo la condición óptima de trabajo una presión de 7 mbar. En la figura 8 se muestran las señales de sonda para distintas posiciones axiales, con 5 y 10 mbar de presión de llenado en una mezcla al 20 %. Se observa que las señales obtenidas con mezclas al 5 y 20 % presentan características similares a igual presión total.



(a) 5 mbar, 20 % de argón en hidrógeno.



(b) 10 mbar, 20 % de argón en hidrógeno.

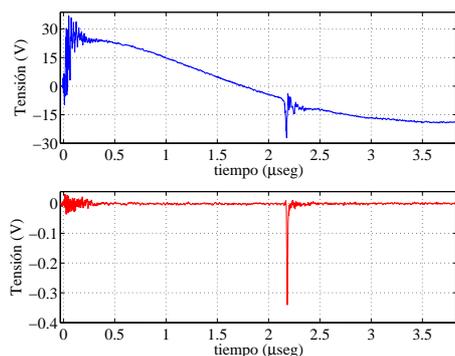
**Figura 8.** Señales de sonda magnética con mezcla de gases. La amplitud de las señales esta normalizada.

Cabe mencionar que se detectó la emisión de pulsos de rayos x de aproximadamente 10 ns de duración, midiendo el ancho a la mitad de altura de la señal. En la figura 9 se aprecian la señal registrada mediante el fototubo y la correspondiente tensión inducida en la bobina de Rogowski para una descarga realizada a una presión de 6 mbar y una mezcla con 20 % de argón.

## V. Discusiones finales y conclusiones

Se adquirieron señales de sonda magnética para distintas concentraciones de argón en hidrógeno y distintas presiones de llenado.

Se observaron diferencias entre los perfiles obtenidos con las mezclas y los obtenidos con los gases puros. En los gases puros las señales presentan un “hombro”, el cual se encuentra ubicado en el flanco creciente para hidrógeno mientras que para argón se halla en el flanco decreciente. En cambio, en el caso de las mezclas se aprecia la presencia de un segundo pico que en ciertos casos llega a ser comparable al principal. Este



**Figura 9.** Señal registrada por la bobina de Rogowski (superior) y tensión registrada por el fototubo (inferior).

comportamiento es particularmente notable a las presiones más bajas estudiadas (5 mbar). La presencia de dos máximos locales en las mezclas a baja presión puede estar asociada a una superposición de las señales de los respectivos gases puros y una mayor complejidad en la estructura interna de la lámina, especialmente al 5 % ya que se corresponde con aproximadamente la misma densidad de masa de cada uno de los gases. Al aumentar la presión, manteniendo constante la relación de densidades, este efecto deja de observarse debido al incremento de masa en la lámina.

Resulta interesante mencionar que la velocidad de la lámina de corriente se mantuvo aproximadamente constante durante la etapa axial de la descarga. Se observó que si bien la masa molecular del argón es 20 veces superior a la del hidrógeno, las velocidades alcanzadas por la lámina en argón son aproximadamente la mitad que en hidrógeno. Se muestra también que las velocidades desarrolladas por la lámina en la mezcla de gases no presentan diferencias significativas con las observadas en hidrógeno puro, al menos hasta una concentración de un 5 % de argón.

Empleando sondas magnéticas, Moreno (9) demuestra que si la lámina perturbada posee un espesor (medido en las mismas condiciones en las que se realiza en el presente trabajo) 2 ó 3 veces mayor que el diámetro del cuerpo de la sonda, las señales inducidas en la bobina sensora no son de simple interpretación; mientras que si dicho espesor es mayor que 5 veces el diámetro del cuerpo, la perturbación ocasionada es despreciable. De acuerdo con esto, y en base a los datos presentados, se puede asumir que la distribución de corriente en la lámina no es perturbada por el cuerpo de la sonda. En consecuencia, y considerando los trabajos de las referencias (14) y (15), se puede asumir que la señal de sonda no difiere apreciablemente del perfil de distribución de corriente.

Considerando además que la velocidad de tránsito de la lámina por la posición de la sonda magnética es aproximadamente constante y del orden de  $7 \text{ cm}/\mu\text{s}$ , resulta que el ancho espacial de la región por la que circula la corriente de descarga se encuentra comprendido entre 2 y 4 cm, tanto en los gases puros como en las mezclas ensayadas.

La duración del pulso de rayos x resultó de aproximadamente 10 ns. Debido a la tan corta duración del pulso de radiación x, el mismo puede resultar sumamente útil para radiografiar objetos metálicos tanto en reposo como en rápido movimiento.

Se observó que el agregado de argón a hidrógeno aumenta el número de focalizaciones respecto a las descargas realizadas en las mismas condiciones para hidrógeno. Para la configuración geométrica de electrodos, tensión de trabajo y presión se encontró que con el agregado de un 20 % de argón se obtienen focalizaciones en el 70 % de las descargas en el rango de presiones entre 5 y 8 mbar.

Finalmente, es conveniente destacar que el proceso de focalización se encuentra influenciado por la evolución de la lámina en etapas anteriores, mostrándose que el agregado de argón en hidrógeno puede favorecer la focalización comparado con los respectivos gases puros. Este hecho podría relacionarse con la presencia de características observadas en mezclas de gases que no se encuentran en los correspondientes gases puros.

## Referencias

- 1 - Moreno C, Llovera R, Tartaglione A and Clause A, *Proceedings of the Regional Conference on Plasma Research in 21st Century*, Paosawatyanong B, Bangkok, Thailand, Chulalongkorn Univ., p. 58–60, 2000.
- 2 - Tartaglione A, Ramos R, García Roselli A, Monticelli F, Clause A y Moreno C, *Anales AFA*, **15**, p. 156-159, 2003.
- 3 - Moreno C, Clause A, Martínez J, Llovera R, Tartaglione A, *Nukleonika*, **26** (1), p. 33–34, 2001.
- 4 - Raspa V, Sigaut L, Vieytes R, Clasusse A y Moreno C, *Anales AFA*, **15**, p. 152-155, 2003.
- 5 - Cobelli P, Knoblauch P y Moreno C, *Anales AFA*, **15**, p. 160-163, 2003.
- 6 - Heo H and Park D, *App. Phys. Letters*, **82** (3), p. 340–342, 2003.
- 7 - Yap S, Wong C, Choi P, Dumitrescu C and Moo S, *Japanese Journal of Applied Physics*, **44** (11), p. 8125–8132, 2005.
- 8 - Pouzo J, Tesis de Licenciatura, Laboratorio de Física del Plasma, FCEyN, UBA, 1974.
- 9 - Moreno C, Tesis Doctoral, INFIP, FCEyN, UBA, 1995.
- 10 - Kwek K, Tou T, and Lee S, *Plasma Science, IEEE Transactions on*, **18** (5), p. 826–830, 1990.
- 11 - Bilbao L, Bruzzone H and Kelly H, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **26** (12B), p. 1535–1548, 1984.
- 12 - Bilbao L, Bruzzone H and Kelly H, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **27** (11), p. 1207–1215, 1985.
- 13 - Kelly H, Garcia G and Bilbao L, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **31** (7), p. 1017-1027, 1989.
- 14 - Bruzzone H, Moreno C and Kelly H, *Meas. Sci. Technol.*, **2** (12), p. 1195–2000, 1991.
- 15 - Bilbao L and Grondona D, *Meas. Sci. Technol.*, **11** (3), p. 288–295, 1994.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo económico de la UBA, del PLADEMA y del CONICET.