

## **CALCULO NUMERICO DE LA PRODUCCION NEUTRONICA EN FUENTES PULSADAS NO RADIOACTIVAS PLASMA FOCUS**

**F. Casanova, A. Clause**

*CONICET, PLADEMA y Universidad Nacional del Centro, 7000 Tandil, Argentina.*

**Keywords:** Plasma Focus, modelo computacional, producción neutrónica, fuente pulsada.

**Resumen.** Los equipos plasma focus como fuente pulsada no radioactiva de neutrones poseen diversas aplicaciones industriales y científicas. La estimación de la producción neutrónica mediante la simulación computacional es fundamental al momento del diseño conceptual de esta clase de dispositivos. Tal cálculo se apoya en el modelo bidimensional de la cinemática de la lámina de plasma, previamente desarrollado, cuyo éxito combina el modelo físico del fenómeno con la aplicación de técnicas de programación computacional. Este modelo se acopla con un modelo algebraico de producción neutrónica existente en la bibliografía, apropiado como primer aproximación, el cual toma los valores de las variables de estado al momento del pinch como valores iniciales. Se obtuvo un buen ajuste y ubicación del máximo de producción para el experimento reproducido, aunque se debieron hacer consideraciones simplificadoras que en modelos más complejos podrán descartarse.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los equipos plasma focus son cañones coaxiales aceleradores de plasma, que mediante reacciones de fusión constituyen fuentes pulsadas de neutrones, partículas cargadas y rayos X de alta energía (Rose and Melville, 1961; Bernard *et al.* 1977), con duraciones de pulsos de  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  seg.

Sus aplicaciones son muy diversas en campos científicos e industriales, debido a los productos de fusión mencionados, su bajo costo relativo, su carencia de riesgos biológicos o cuidados especiales, y su posibilidad de fácil transporte mediante el diseño de equipos compactos, en contraste con otras fuentes no pulsadas disponibles en el mercado. Entre las aplicaciones principales podemos mencionar neutrografías, detección de fisuras, radiografías ultra rápidas y detección de sustancias.

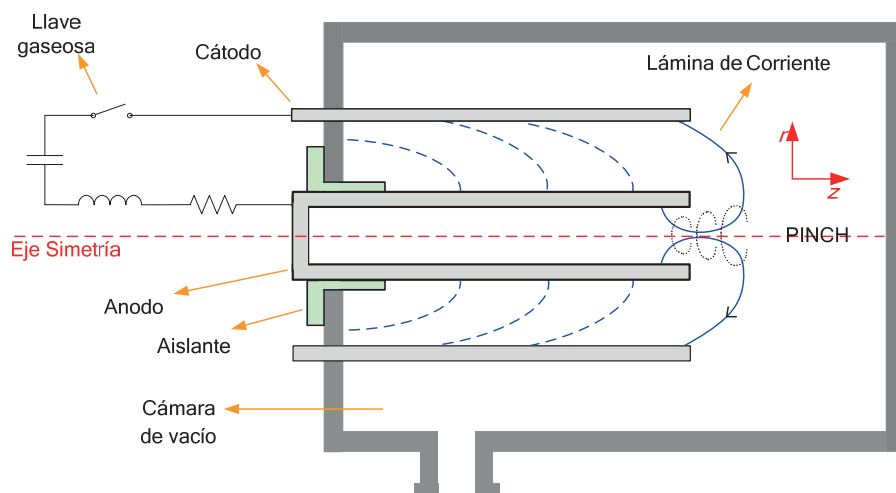


Figura 1: Esquema de un Plasma Focus tipo Mather.

Un dispositivo plasma focus puede describirse como un circuito RLC en serie con una llave gaseosa de cierre y una inductancia variable constituida por el cañón acelerador de plasma. Al cerrar la llave gaseosa luego de alcanzada la energía de ionización se produce la ruptura dieléctrica del gas y comienza la descarga del banco de capacitores (Kelly, 1978). La descarga en el gas se localiza inicialmente en la base de los electrodos a lo largo del aislante que los separa, y se concentra en una capa delgada donde se produce el cambio de fase gaseosa a plasma, área comúnmente denominada lámina de plasma o de corriente.

Luego de un transitorio inicial, el campo magnético azimutal generado por la corriente produce una fuerza  $\vec{J} \times \vec{B}$  (fuerza de Lorentz) que acelera la lámina de plasma hacia el extremo abierto de los electrodos.

La lámina de corriente desborda cuando llega al extremo del ánodo y a partir de ese momento el campo magnético también acelera el plasma hacia el eje del sistema. Finalmente la lámina choca en el eje formando un cilindro de plasma denso y caliente (llamado foco o pinch). El tiempo de vida del foco es de algunas decenas o centenas de nanosegundos. Durante este período se produce la emisión de radiación electromagnética en un amplio rango de energías, y si el gas utilizado es Deuterio se producen reacciones de fusión lo que provoca la producción de neutrones de 2,45 MeV (energía de neutrones de fusión D-D).

En trabajos previamente presentados, nos enfocamos en modelos computacionales de dispositivos plasma focus tipo Mather (Mather, 1964), se propuso un modelo bidimensional

basado en la discretización espacial de la lámina de plasma (Casanova *et al.*, 2005), denominado CSHOCK.

Dicho modelo se basa en la discretización bidimensional de la lámina de corriente mediante elementos cónicos coaxiales. En cada instante los elementos mantienen sus variables de estado mecánicas y termodinámicas: masa, posición, velocidad, aceleración, densidad y energía interna.

A su vez se resuelven las ecuaciones del circuito RLC asociado, y un modelo de caída de potencial en la llave gaseosa dependiente de los parámetros  $\alpha$  y  $t_0$  característicos, que reflejan, el primero, la interacción entre el rompimiento dieléctrico en el spark gap (llave gaseosa) y el rompimiento dieléctrico sobre el aislante dentro de cañón acelerador de plasma, y el segundo, el instante de cierre de la llave.

Este modelo propuesto fue validado en diversos aspectos, ya sea en la correcta descripción de la cinemática de la lámina de corriente, validando tiempos de llegada de lámina a distintas posiciones y forma de lámina, como en los valores obtenidos de parámetros eléctricos representativos del comportamiento global del mismo, como lo es la evolución de la inductancia del sistema (Casanova *et al.*, 2008).

En esta publicación se presenta la primera aproximación a un modelo de producción neutrónica que se acopla al modelo bidimensional mencionado.

## 2 MODELO DE PRODUCCIÓN NEUTRÓNICA

Las características y flexibilidad del modelo computacional (Casanova *et al.*, 2005), permiten acoplar al momento del pinch, cualquier modelo que tome como valor inicial el valor de las variables de estado en el punto que la lámina de plasma llega al eje de simetría, como puede observarse en la Figura 1.

Como primer aproximación al cálculo neutrónico, se acopló el modelo algebraico de producción neutrónica presentado en (Moreno *et al.*, 2000), el cual ya fue acoplado a un modelo unidimensional de plasma focus con buenos resultados (González, 2004).

Este modelo partiendo de la producción total durante tal pulso, que viene dada por:

$$Y = \frac{1}{2} \int_{\Delta t} n^2 \langle \sigma_v \rangle V dt \quad (1)$$

Y asumiendo que durante el período reactivo las variables permanecen cerca del equilibrio de Bennett, y luego del desarrollo mostrado en (Moreno *et al.*, 2000) obtiene la expresión aproximada de la producción neutrónica total que resulta en:

$$Y = \frac{h}{128} * \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \right)^2 * \sqrt{\frac{3M_d \langle \sigma_v \rangle^{*2}}{(kT^*)^5}} * I^4 * \frac{\theta_B^{-\frac{19}{6}} * e^{-\theta_B^{\frac{1}{3}}}}{R_B} \quad (2)$$

Que es la ecuación utilizada para el cálculo de la producción de neutrones considerando un pinch cilíndrico, con longitud del cilindro  $h$  igual a la longitud del primer segmento del modelo bidimensional que llega al pinch.

Si bien experimentalmente se miden varios picos de producción neutrónica, que indican la formación de diversos focos de fusión en diferentes instantes de tiempo, en esta primer aproximación se realiza una simplificación considerando que solamente el primer elemento discreto de lámina que toca el eje producirá el total de las reacciones de fusión, y en base a su

estado termodinámico y el estado del circuito eléctrico en ese momento se realiza el cálculo de producción neutrónica.

Las pruebas realizadas se centraron en datos experimentales del dispositivo GN1 del INFIP-UBA disponibles en (Moreno *et al.*, 2000), y se buscó verificar las tendencias en los valores de producción que se sigue en otros modelos y experimentalmente.

Se utilizó el modelo de caída de tensión en la llave gaseosa previamente mencionado, con los siguientes parámetros del simulador:

Parámetro	Valor
$\alpha$	$7 \mu\text{s}^{-1}$
$t_0$	$0.1 \mu\text{s}$
$K$	3.5
$dt$	$1 \cdot 10^{-9}$ seg
densidad segmentos	2 seg/mm

Donde los primeros dos parámetros son los mencionados de la llave gaseosa,  $K$  es la relación entre la densidad de la lámina de plasma y la densidad del gas estancado, como se menciona en (Casanova *et al.*, 2005), este parámetro de ajuste que surge de asumir válida la relación Rankine-Hugoniot (Anderson, 2006), impacta en el espesor de la lámina simulada, y los siguientes dos parámetros son los típicos de la simulación espacial, el paso de tiempo y el tamaño de los elementos (segmentos) discretos.

Se logró un ajuste a los valores medidos de tiempo de llegada al foco para diversas presiones, como puede observarse en la Fig. 2.

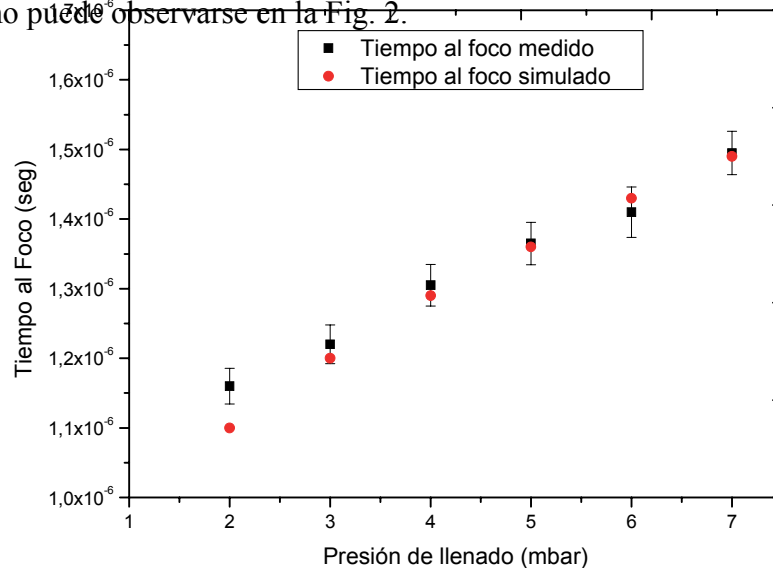


Fig. 2 – Tiempo al foco medido vs. simulado

Una vez logrado este ajuste cinemático, se realizaron los cálculos de producción neutrónica. Como resultado encontramos que para explicar los datos neutrónicos experimentales era necesario suponer una temperatura de pinch bastante menor que la temperatura de Bennett asumida en el modelo algebraico de producción neutrónica utilizado, y una longitud de pinch del orden de las décimas de milímetro. Como puede verse en la Fig. 3,

con las suposiciones mencionadas la tendencia numérica concuerda con la experimental, incluso en la ubicación del máximo.

Es por este comportamiento que se agregó una variable de ajuste  $\beta$  de manera que en el modelo algebraico la temperatura en el equilibrio resulta:

$$T_B = \beta \cdot \frac{l_i}{k} \left( \frac{\mu_0}{16\pi} \right) \left( \frac{M_d}{M_i} \right) I^2 \quad (3)$$

La medición experimental de la temperatura del pinch es una medición muy difícil de realizar (téngase en cuenta que el pinch es de muy corta duración y las temperaturas son muy altas). Las pocas menciones que aparecen en la literatura de mediciones indirectas mencionan temperaturas promedio menores que la de Benett, lo cual está de acuerdo con nuestros resultados.

La relación de densidades  $K$  de ajuste es 3,5; resulta interesante observar que este valor es cercano a 4 que es el valor típico de relación de densidades en ondas de choque supersónicas planas (Shapiro, 1953) (Anderson, 2006).

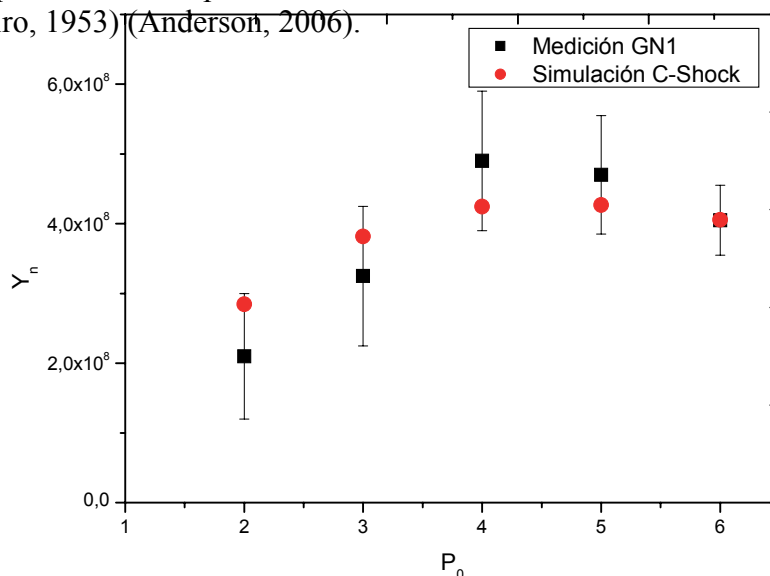


Fig. 3 – Producción Neutrónica  $Y_n$  medida en el dispositivo GNI [Moreno et al., 2000] vs. Producción neutrónica calculada mediante el simulador C-Shock. ( $\beta=1/120$ )

A continuación en la Fig. 4 se muestra la variación de la producción para 4 mbar (valor de producción máxima) respecto a la relación  $K$  de densidades. Puede observarse una relación casi lineal, y se evidencia un comportamiento monótono y con escasa dispersión, lo cual deja una base muy favorable para continuar trabajos futuros buscando desde el punto de vista experimental y de los modelos determinar en forma general el valor de  $K$ , con lo cuál dejaría de ser una variable de ajuste del modelo.

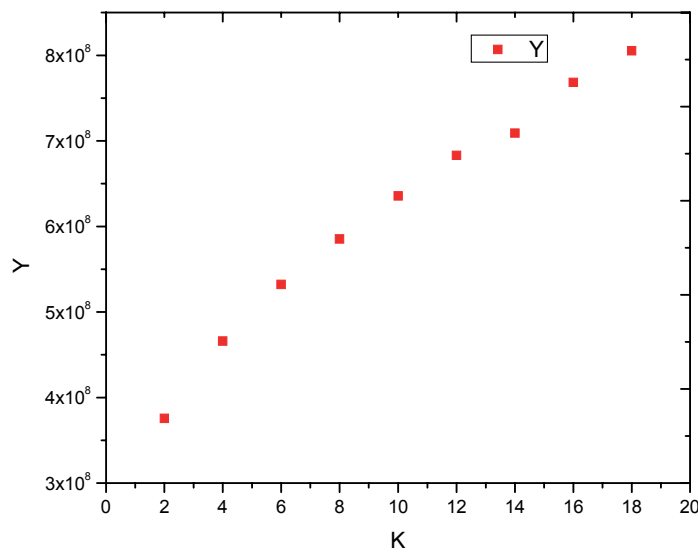


Fig. 4 – Producción Neutrónica  $Y$  vs. Relación de densidades  $K$

### 3 CONCLUSIONES

Se presentó un modelo numérico de producción neutrónica en dispositivos Plasma Focus, que fue acoplado al modelo CSHOCK de cinemática bidimensional de ondas de choque de plasma. El modelo tiene suposiciones simplificadoras muy fuertes, a saber producción total en un único pulso, longitud del pinch igual al segmento discreto que llega al eje, relación de densidades constante entre la lámina y el gas estancado, y temperatura del pinch proporcional a la temperatura de Bennett. Sin embargo, los resultados numéricos muestran que esta primer aproximación puede explicar cualitativamente los datos experimentales.

Como extensión futura del modelo de producción neutrónica se considerará no sólo el primer segmento de lámina que llega al pinch, sino una cascada, lo cual probablemente lleve a un comportamiento oscilatorio, con varios puntos de generación de neutrones separados espacial y temporalmente, fenómeno que fue observado en varias mediciones experimentales.

### REFERENCIAS

- Anderson J. D., Hypersonic and high-temperature gas dynamics, *AIAA, Virginia, 2nd Ed.*, p. 38, 2006."
- Bernard, A., Cloth, P., Conrads, H., Coudeville, A., Goulan, G., Jobs, A., Maisonnier, Ch. and Rager, J. P., The Dense Plasma Focus – A High Intensity Neutron Source, *Nuclear Instruments and Methods*, 145:191-218, 1977.
- Casanova, F., Moreno, C. and Clause, A., Finite-elements numerical model of the current-sheet movement and shaping in coaxial discharges, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 47:1239-1250, 2005.
- Casanova F., Clause A., Bruzzone H., González J., Modelo de Inductancia Variable para la Simulación Bidimensional de Plasma Focus, *Mecánica Computacional Vol XXVII*, 3425-3433. 2008.

- González J. H., “Utilización De Plasmas Densos Magnetizados Como Fuentes De Neutrones”, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Mayo de 2004.
- Kelly, H., Régimen de operación de los equipos Plasma Focus desde el punto de vista de la optimización de la producción de reacciones de fusión, *Tesis de Doctorado en Ciencias Físicas, Facultad de Cs. Exactas, Universidad de Buenos Aires*, 1978.
- Mather, J. W., Investigation of the high energy acceleration mode in the coaxial gun, *Phys. Fluids*, 7:28, 1964.
- Moreno C, Bruzzone H., Martínez J., Clause A., Conceptual engineering of Plasma Focus termonuclear pulsors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28, vol. 5, pp. 1735-1741, 2000.
- Rose, D. J. and Melville Jr., C., Plasmas and controlled fusion, *Wiley, London*, 1961.
- Shapiro A., The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, *The Ronald Press Company*, I, 112, 1953.