

DISEÑO Y OPERACIÓN ÓPTIMOS DEL PLASMA FOCUS TERMONUCLEAR

Ramos R.¹, González J.², Clause A.³
Instituto Balseiro - CNEA - PLADEMA - UNICEN

RESUMEN

Se obtuvieron los mapas de operación y diseño de dispositivos Plasma Focus (PF) basados en un modelo de parámetros concentrados de la ecuaciones MHD del plasma. Para un dado banco de capacitores, estos mapas permiten determinar la longitud de los electrodos y la presión de carga de la cámara, a partir del requerimiento de un determinado valor de producción neutrónica.

Para lograr el objetivo se realizó un análisis de sensibilidad de la producción neutrónica respecto a diferentes parámetros de ajuste, presentes en el modelo que simula el comportamiento de estos aparatos. Luego, se seleccionaron los parámetros que permitían la optimización de la producción neutrónica y finalmente, se obtuvo la superficie que describe la variación de la producción neutrónica óptima en función de dos parámetros. También se calcularon las superficies para la longitud de electrodos y presión de carga, correspondientes a los valores óptimos de producción, en función del mencionado par de parámetros.

ABSTRACT

Optimum Design of Plasma Focus

The optimum design of Plasma Focus devices is presented based in a lumped parameter model of the MHD equations. Maps in the design parameters space are obtained, which determine the length and deuterium pressure required to produce a given neutron yield. Sensitivity analyses of the main effective numbers (sweeping efficiencies) was performed, and lately the optimum values were determined in order to set a basis for the conceptual design.

INTRODUCCIÓN

Un dispositivo Plasma Focus (PF) consiste básicamente en un par de electrodos cilíndricos coaxiales, colocados en una cámara con gas a baja presión, entre los cuales se descarga un banco de capacitores (Fig.1). Al producirse la descarga se forma una lámina de plasma, la cual se va acelerando por el campo magnético azimutal generado por la misma corriente. Al llegar al extremo de los electrodos, la lámina se cierra hacia el eje e implota. Si se usa deuterio o deuterio - tritio, esta implosión eleva la temperatura de la lámina de plasma hasta valores del orden de las necesarias para activar reacciones de la fusión de los elementos mencionados. De esta manera es posible generar un pulso de neutrones ultracortos de gran intensidad.

[1] ramosr@ib.cnea.gov.ar [2] pampa@cab.cnea.gov.ar [3] clause@cab.cnea.gov.ar

Se ha desarrollado un código de cálculo cuasi-bidimensional de parámetros concentrados que describe la evolución temporal de las distintas variables involucradas en el cálculo de la producción neutrónica. El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la variación de los diferentes parámetros concentrados en la producción neutrónica, y encontrar el conjunto de parámetros de diseño óptimos. El análisis se realizó sobre la base del microreactor argentino GN1 cuyas características técnicas se detallan en la Tabla 1.

MODELO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO

Las principales simplificaciones, del modelo utilizado, son el considerar al plasma como un gas ideal, el representar la lámina de corriente como un pistón plano y el suponer que el cociente entre la densidad de la lámina y la densidad de carga de cámara permanece constante ($\rho_l/\rho_o = K$). El modelo fue presentado en las reuniones de la AATN de años anteriores, donde se puede consultar los detalle matemáticos y físicos (Ver sección referencias).

La producción neutrónica se calcula, suponiendo termofusión nuclear, de la siguiente manera:

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{2} \int_0^R n^2(r) \cdot \langle \sigma v \rangle (r) \cdot 2\pi r dr \quad (1)$$

donde:

r : coordenada radial

Y: producción neutrónica

n: densidad de deuterones, relacionada en forma directa con la densidad en el pinch.

$\langle \sigma v \rangle$: sección eficaz de fusión térmica para el Deuterio, es una función de la temperatura, la que a su vez es función de la coordenada radial.

t : tiempo

Los factores en la ecuación (1) son calculados en función del tiempo por el modelo de parámetros concentrados.

Para un dado banco de capacitores, la producción neutrónica de un P.F. está determinada por la longitud de los electrodos y por la presión de carga . La presión es el parámetro de operación que se usa para que el máximo de corriente coincida con la formación del plasma denso.

Por otra parte, el modelo involucra cuatro parámetros del modelo que sirven para ajustar la producción neutrónica:

$K = \rho_l/\rho_o$ (factor “barredora de nieve”): Relaciona la densidad de la lámina con la densidad de llenado del D-D.

ξ_A (coeficiente de barrido de masa axial) : Relacionado con el porcentaje de gas incorporado a la lámina de corriente en la etapa de barrido axial . En la práctica este parámetro puede ser variado mediante la forma de los electrodos.

ξ_R (coeficiente de barrido de masa radial) : Relacionado con el porcentaje de gas incorporado a la lámina de corriente en la etapa de barrido radial. Aquí se tiene en cuenta en cierta manera las inestabilidades que pueden afectar la focalización de la lámina en el eje.

β (factor entre velocidades de barrido) = V_{axial}/V_{radial} : Relaciona la velocidad de inicio del barrido radial con la velocidad del final del barrido axial.

RESULTADOS

El trabajo se dividió en tres partes

1. Análisis de sensibilidad de la producción neutrónica respecto de ξ_A , ξ_R , β y K . El resultado de este estudio fue la selección de los parámetros que permiten optimizar la producción neutrónica. Estos resultaron ser ξ_A y ξ_R .
2. Optimización de la producción neutrónica en función del parámetro más sensible. El estudio se realizó respecto a ξ_A .
3. Obtención de los mapas de operación y diseño. Se obtuvieron las superficies para la producción óptima en función de ξ_A y ξ_R

Análisis de Sensibilidad

Se calculó la variación de la producción neutrónica en función de los diferentes parámetros de ajuste.

En las Fig. 2 se observa la variación de Y con ξ_A manteniendo los demás parámetros fijos. La existencia del máximo se puede explicar analizando las diferentes variables involucradas en el cálculo de la producción. A medida que aumenta ξ_A el radio en el pinch aumenta lo que provoca que la producción neutrónica tienda a crecer. Por otro lado, a medida que se incrementa ξ_A las temperaturas y densidades en el pinch son menores, lo cual provoca que la producción neutrónica sea menor. Inicialmente influye más el efecto del radio pero luego prevalecen los efectos de la densidad y de la temperatura.

En las Fig. 3 se observa la variación de Y con K . A medida que se va incrementando la densidad de la lámina, las temperaturas y densidades en el pinch son mayores y en consecuencia la producción neutrónica aumenta. Si bien el radio va disminuyendo con el incremento de K (lo cual provoca que la producción disminuya), su efecto es despreciable y se obtiene como resultante, para Y en función de K , una curva monótona creciente.

En las Fig. 4 se grafica la variación de Y con ξ_R . Con el aumento de ξ_R se incrementa el radio en el pinch y, por este efecto, la producción neutrónica tiende a crecer. Por otro lado, cuando ξ_R crece la densidad y, sobretodo la temperatura en el pinch, decrecen y la producción tiende a disminuir. Para valores pequeños de ξ_R es más importante el efecto del aumento del radio mínimo, mientras que para valores grandes del mismo, prevalecen los efectos de la temperatura y densidad ya que la compresión pierde efectividad.

En la Tabla 2 se muestra una síntesis de los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad. De aquí se puede concluir que los parámetros que hay analizar para la optimización de la producción neutrónica son ξ_A , ξ_R y β . Sin embargo si se realiza un estudio comparativo (Fig. 5) se puede ver que el factor con mayor influencia en la producción neutrónica es ξ_A . Le sigue, en un grado mucho menor ξ_R , mientras que la influencia de β es despreciable frente a la de los otros parámetros.

De los resultados obtenidos se concluye que los parámetros del modelo, ξ_A y ξ_R , se pueden utilizar para optimizar la producción neutrónica de los Plasma Focus.

Optimización de la producción neutrónica con el coeficiente de barrido axial

Para un dado valor de ξ_A se calculó la producción neutrónica (Y) variando la presión de llenado (P_o) y la longitud del electrodo (Long.) y se encontró el óptimo de producción neutrónica para un dado par (P_o , Long.) correspondientes al máximo. En la Fig. 6 se tiene las curvas de nivel para $\xi_A = 0.1$. La presencia de un valor óptimo se puede explicar de la siguiente manera: Para una longitud fija, la presión de llenado es la que determina el momento en que se produce el pinch. La presión óptima es la que hace coincidir la formación del pinch con el máximo de corriente. Para la presión óptima, la temperatura del pinch depende de la longitud de los electrodos. El valor óptimo de esa longitud corresponde a la temperatura que maximiza la reacción de fusión.

El proceso de cálculo se repitió para valores de ξ_A comprendidos entre 0.1 y 1. En la Fig. 7 se observa la producción neutrónica óptima en función del factor de barrido axial. Se observa la presencia de un óptimo y la máxima variación es de aproximadamente un 50%.

En las Fig. 8 se muestra la presión de carga y la longitud de los electrodos, para los cuales se presentan estos óptimos, en función de ξ_A . Se puede concluir que el ajuste para la producción neutrónica óptima se obtiene mediante la disminución de la longitud del electrodo mientras que la presión de llenado permanece prácticamente inalterable. Sin embargo, esta conclusión no puede ser definitiva ya que falta estudiar la influencia de ξ_R .

Obtención de mapas de diseño y operación

Se realizó el estudio de optimización de la producción neutrónica con los factores de barrido axial y radial. En la Fig. 9 se tiene la producción neutrónica óptima en función de ξ_A y ξ_R . Al disminuir los coeficientes de barrido, la producción neutrónica óptima se incrementa. Se puede ver que el aumento es prácticamente simétrico respecto de ambos parámetros.

En las figuras 10 y 11 se grafican la presión de carga y la longitud de electrodos, correspondientes a los valores óptimos de producción, en función de los coeficientes mencionados. De los resultados obtenidos, se puede decir que el incremento de producción neutrónica viene acompañado de un fuerte aumento de la presión observándose además que la dependencia de esta última es, fundamentalmente, con el factor de barrido radial. Por su parte, la longitud de los electrodos depende principalmente, del factor de barrido axial y aumenta con la disminución del mismo. Con

los resultados de este estudio de optimización, se tiene la base de los mapas de diseño y operación de dispositivos Plasma Focus termonucleares. Si, para un determinado banco de capacitores, se desea una cierta producción neutrónica se ingresa con el valor requerido en la superficie de producción neutrónica y se obtienen los valores de ξ_A y ξ_R correspondientes. Con estos valores se ingresa en las superficies para la longitud de electrodo y la presión de llenado y se tiene determinada la dimensión característica del P.F. como así también su presión de carga.

CONCLUSIONES

Fueron determinados los parámetros, del modelo numérico para dispositivos Plasma Focus, que tienen una influencia apreciable para la optimización de la producción neutrónica. El parámetro respecto al cual la producción resultó ser más sensible fue el coeficiente de barrido de axial, parámetro que puede ser modificado físicamente mediante la forma de los electrodos ya que esta relacionado con la cantidad de masa acumulada en la lámina durante la etapa axial. Un diseño de la mejor forma de los electrodos involucra la confección de un código bidimensional que permita la confección de distintas geometrías de entrada. Dicho código se encuentra actualmente en elaboración dentro del marco de la red Pladema.

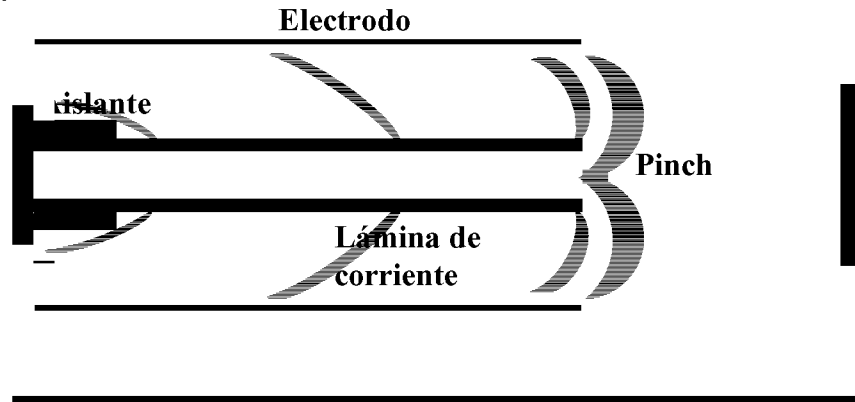
Se determinaron los mapas de diseño y operación para Plasma Focus cuyo banco de capacitores sea igual al del GN1. Es decir se consiguió una herramienta que permite mejorar la producción neutrónica variando la longitud de los electrodos y la presión de carga.

De aquí en más, lo que resta es comprobar experimentalmente, en el mayor rango de dimensiones posible, los resultados de los mapas de diseño y operación. También se recomienda verificar el análisis, aquí realizado, con otro Plasma Focus, cuyas características del banco de capacitores sea diferente al estudiado.

REFERENCIAS

- 1- J. H. González, A. Clause, P. C. Florido. "Modelado óptimo de equipos Plasma Focus para fuentes pulsadas de neutrones de bajo costo". AATN 1997.
- 2- C. Moreno, H. Bruzzone, J. Martínez, A. Clause. "Conceptual engineering of plasma-based neutron pulsors". IEEE Trans. Plasma Science.
- 3- J. H. González, A. Clause, P. C. Florido, H. Bruzzone. "A lumped parameter model of Plasma Focus". AATN 1998. LAWPP 1998.
- 4- J. H. González, A. Clause, P. C. Florido, L. Bilbao, H. Bruzzone, C. Moreno, J. Martínez. "Generación pulsada de neutrones con plasmas densos". AATN 1999.

Cámara



■ ■

■ ■ Banco de capacitores

Fig. 1 – Esquema de un Plasma Focus

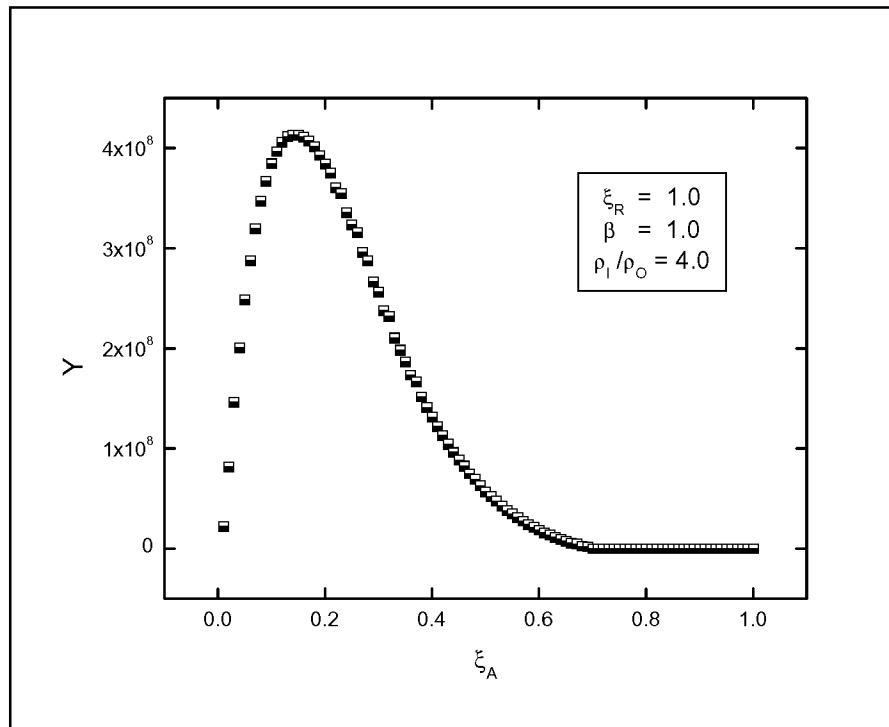


Fig. 2 - Variación de la producción neutrónica con el parámetro de barrido axial.

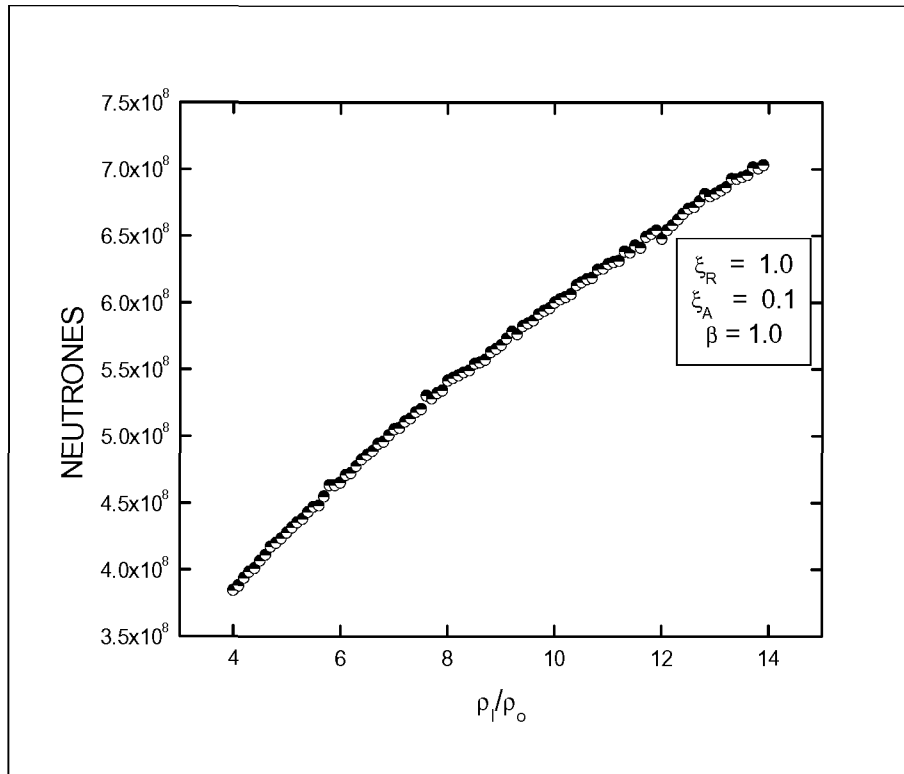


Fig. 3 - Variación de Y con ρ_1/ρ_0

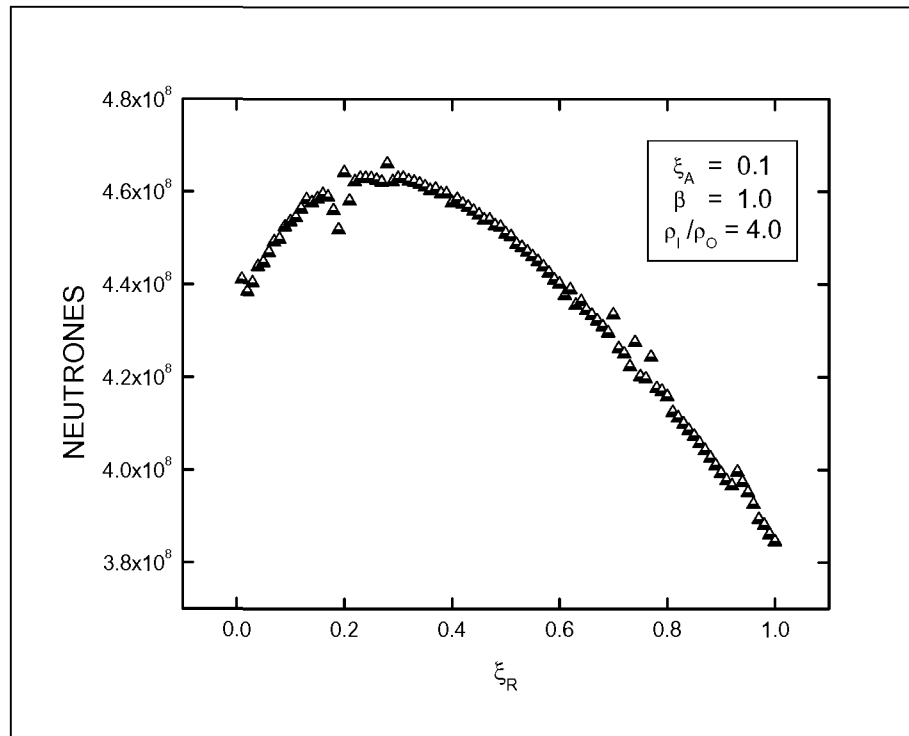


Fig. 4 - Variación de Y con ξ_R

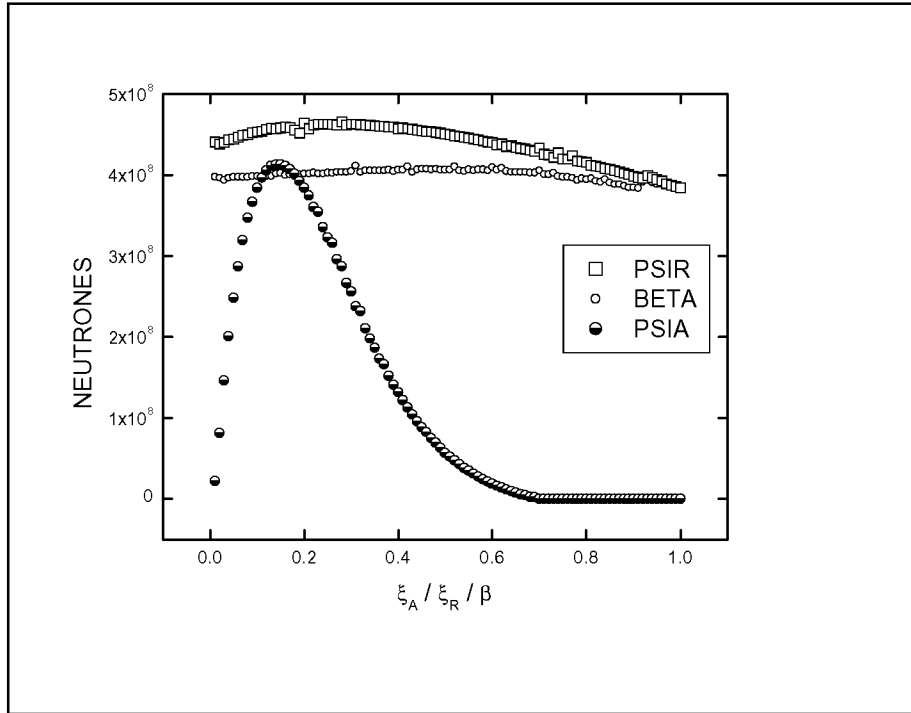


Fig. 5 – Comparación de la producción neutrónica variando los diferentes parámetros de ajuste.

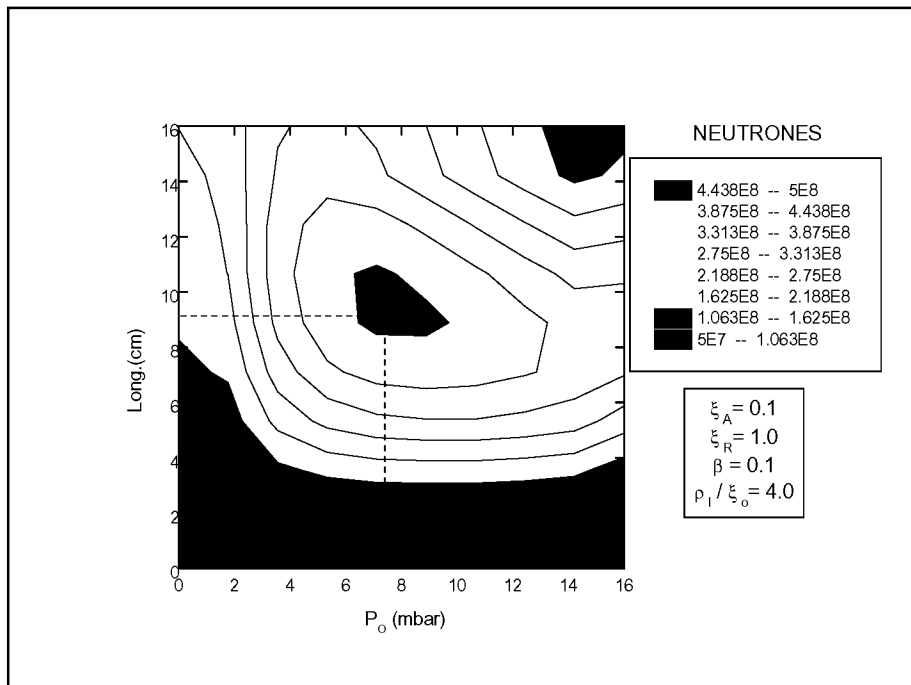


Fig. 6 – Curvas de nivel de producción neutrónica en función de la presión de llenado y longitud del electrodo.

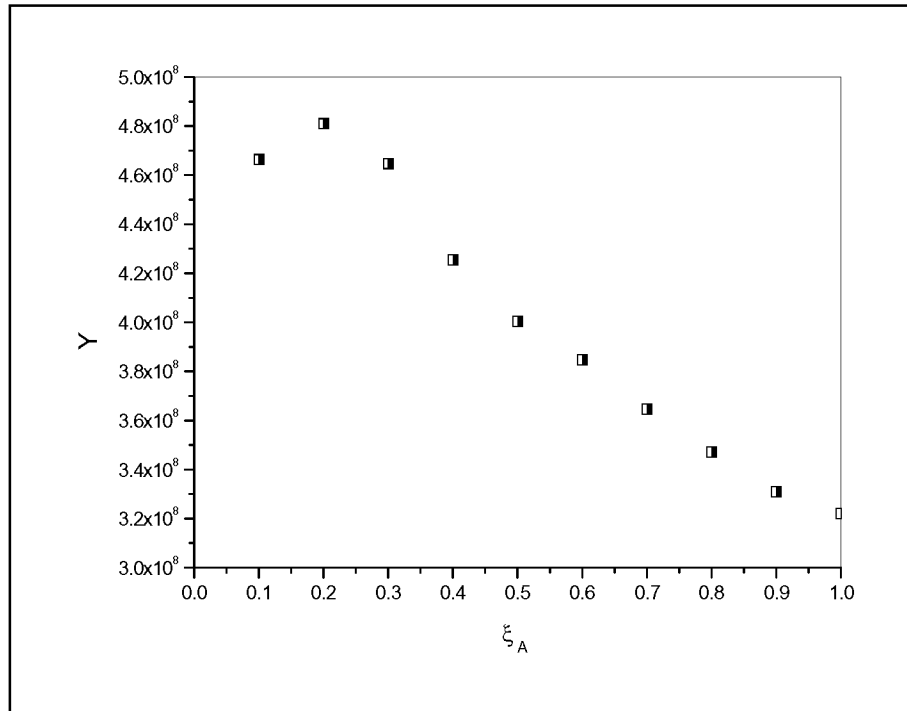


Fig. 7 – Producción neutrónica óptima en función del ξ_A .

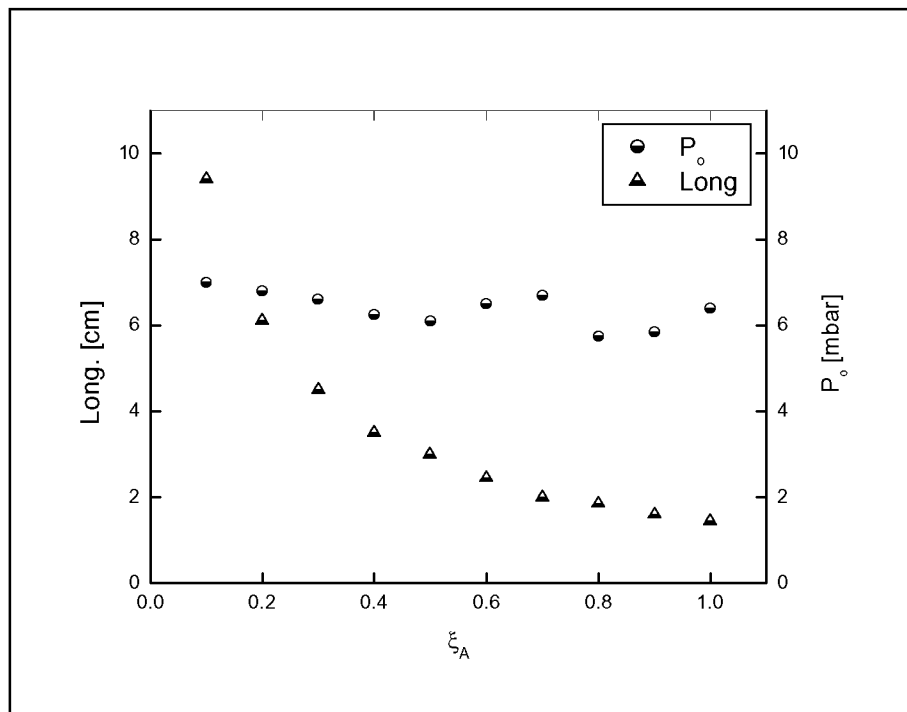


Fig. 8 – Presión y longitud del electrodo, en los óptimos de producción neutrónica, en función de ξ_A .

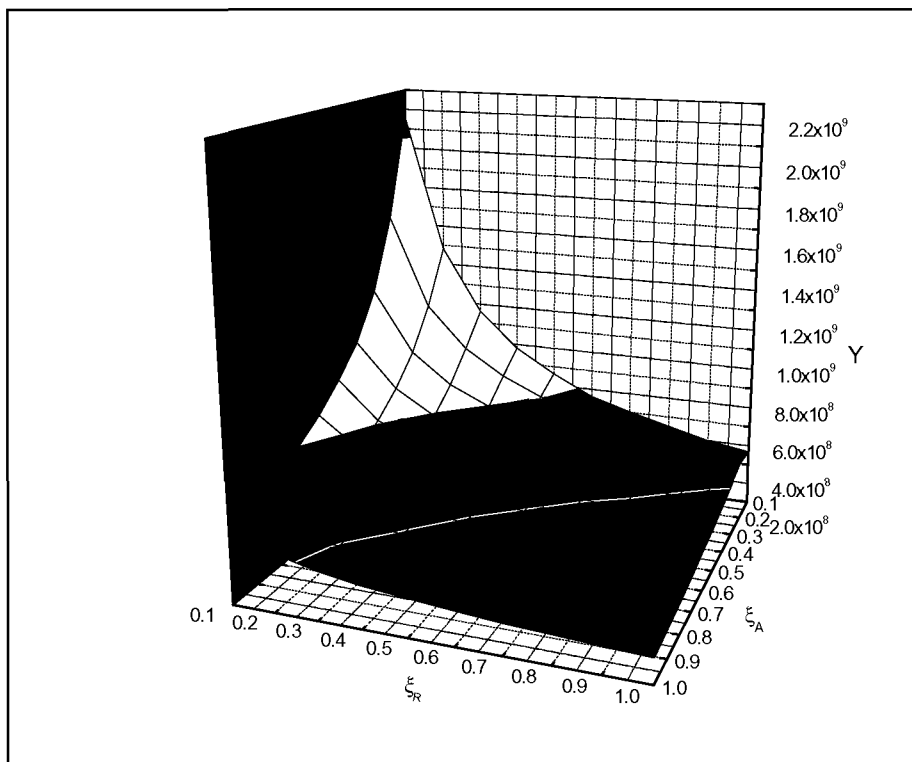


Fig. 9 – Producción neutrónica óptima en función de los coeficientes axial y radial de barrido.

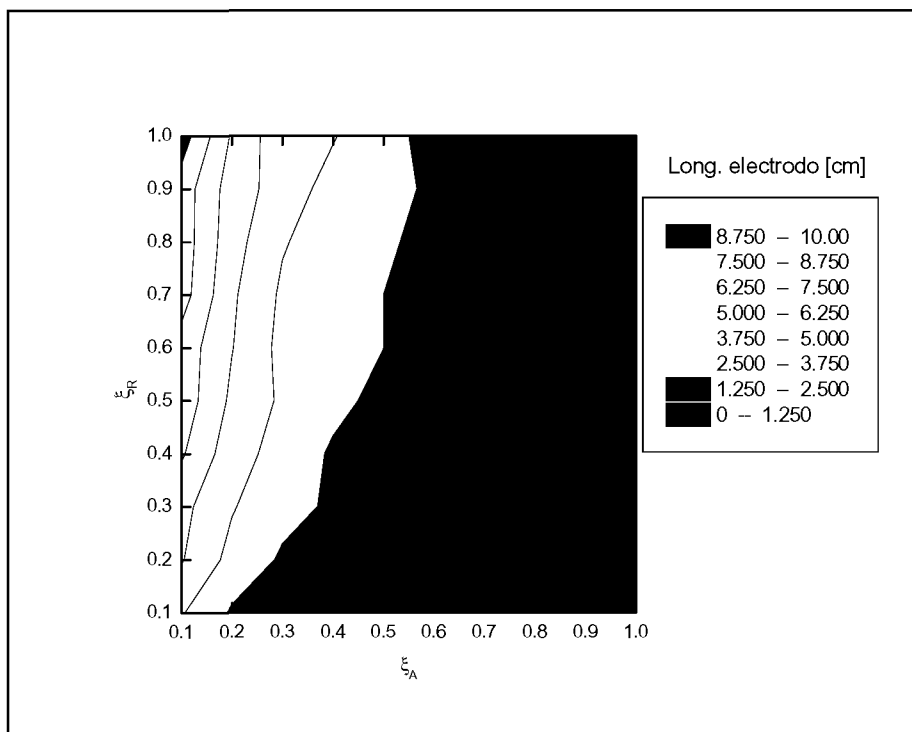


Fig. 10 - Longitud óptima de los electrodos en función de los coeficientes axial y radial de barrido.

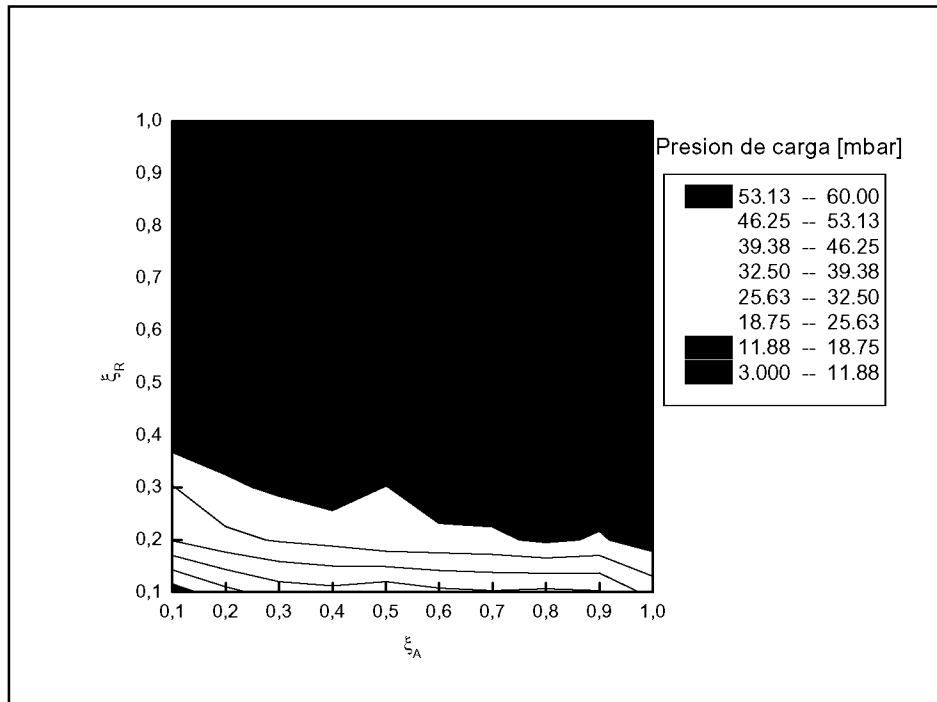


Fig. 11 – Presión de llenado en función de los coeficientes axial y radial de barrido.

Capacidad (C)	10.5 μ F
Voltaje (V)	30 kV
Inductancia del conexionado (L)	39 nHy
Radio electrodo interno (Ri)	1.9 cm
Radio electrodo externo (Re)	4.2 cm
Longitud de electrodos (Long.)	8.71 cm
Rango de presiones de llenado (P _o)	2 – 7 mbar

Tabla 1 – Características del GNI.

Parámetro incrementado	Variables en el Pinch					
	r	T	ρ	$\rho.r$	σ	Y
ξ_A	crece	decrece	decrece	crece	decrece	Tiene óptimo
ξ_R	crece	decrece	decrece	crece	decrece	Tiene óptimo
β	decrece	crece	crece	decrece	crece	Tiene óptimo
K	decrece	crece	crece	crece	crece	Crece

Tabla 2 – Resultados del Análisis de Sensibilidad de la producción neutrónica respecto a los diferentes parámetros de ajuste.