

# **¿QUÉ ES LA TECNOLOGÍA DE PULSORES TERMONUCLEARES PLASMA FOCUS?**

Ramos R., González J., Moreno C., Clausse A.  
Instituto Balseiro – Centro Atómico Bariloche – INFIP - CNEA – PLADEMA

## **RESUMEN**

En este trabajo se describe un tipo de generador de radiación pulsada, denominado Plasma Focus, que contribuye a diversas aplicaciones, cubriendo un espectro de situaciones para los cuales ciertos generadores tradicionales no son viables. En particular son de destacar las características de transportabilidad y no-contaminación, que permiten la realización de ensayos in-situ facilitando enormemente la logística de las operaciones. Los Plasma Focus, que pueden pulsos de neutrones por reacciones de fusión termonuclear, cumplen con los requerimientos mencionados, teniendo además, la característica diferencial de ser de muy bajo costo, con lo cual se puede asegurar su competitividad en el mercado actual.

## **ABSTRACT**

In this paper we describe a type of neutron generators, called Plasma Focus, which is suitable to several applications, where traditional generators are non-applicable. The main characteristics are its transportability and to be non-contaminating, which would allow in-situ tests. The Plasma Focus, produces neutron pulses by thermonuclear fusion reactions, satisfy these requirements and it is comparatively non expensive. This last feature would assure competitiveness in the neutron sources market.

## **INTRODUCCION**

La radiación neutrónica tiene múltiples aplicaciones en diversos sectores como ser el análisis por activación de sustancias contaminantes (medio ambiente), la radiografía (industria), el estudio de estructuras moleculares (ciencia y tecnología), la terapia de cáncer (medicina), la detección de humedad y nutrientes (agricultura), la confección de litografías (hardware computacional), recubrimiento de superficies (materiales), entre otras. Una dificultad importante para estas aplicaciones es la generación de la radiación. Los generadores más usados son los aceleradores de partículas, los reactores y las fuentes isotópicas. Entre las desventajas que estos generadores presentan están la imposibilidad o peligrosidad de manejo y transporte, y los elevados costos. En este marco los dispositivos Plasma Focus, que generan rayos X, protones y neutrones a partir de reacciones de fusión termonuclear pulsadas se presentan como una alternativa válida para diversas aplicaciones.

Este trabajo tiene como propósito explicar en qué consiste la tecnología Plasma Focus y cuáles son sus potenciales aplicaciones. Los dispositivos Plasma Focus y más en general los pulsos termonucleares son el objeto de estudio del PLADEMA [1].

El PLADEMA es una Red Interinstitucional, dedicada al estudio y desarrollo de aplicaciones con PLASmas DENsos MAGnetizados. La red está conformada por CNEA y las Universidades Nacionales del Centro, de Rosario, de Mar del Plata y el Instituto de Física del Plasma de la Universidad de Buenos Aires.

## DESCRIPCION DEL FENOMENO PLASMA FOCUS

Un dispositivo PLASMA FOCUS (P.F.) consiste básicamente en un par de electrodos cilíndricos coaxiales, colocados en una cámara con gas a baja presión, entre los cuales se descarga la tensión almacenada en un banco de capacitores. 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 como gas de llenado, esta implosión eleva la temperatura de la lámina de plasma hasta valores del orden de las necesarias para activar la fusión termonuclear de los gases mencionados. De esta manera es posible generar un pulso de neutrones de gran intensidad y corta duración .

El proceso que tiene lugar en los Plasma Focus puede dividirse en cuatro etapas. A continuación se describirá con cierto detalle cada una de ellas.

En al Figura 1 se observa una simulación tridimensional del fenómeno Plasma Focus. Las figuras mostradas corresponden a una descarga en el Plasma Focus GN1, calculada numéricamente con una técnica de elementos finitos adaptativos desarrollada en el PLADEMA, que permite simular la variación de la forma de la lámina de plasma durante la aceleración en el cañón, desborde y pinch.

**Ruptura dieléctrica del gas:** Al producirse la descarga salta un arco de corriente en forma de lámina sobre el aislante (Figura 1.1) estableciéndose un circuito de corriente eléctrica. Los valores de tensión de descarga, según datos de equipos existentes en la actualidad, van desde los 10 KV hasta los 100 KV. La descarga se inicia a largo del aislante que separa los electrodos debido a la mayor densidad de electrones libres en la superficie del sólido. Según la descarga se va concentrando, la lámina de corriente, en formación, se yergue por sobre el aislante. El movimiento es predominantemente radial hacia el electrodo externo (Figura 1.2). Cuando la lámina alcanza dicho electrodo se hace importante recién el movimiento axial (Figura 1.3). La forma en que se ubica el aislante y sus dimensiones se eligen siguiendo criterios empíricos.

**Desplazamiento y Barrido Axial :** La lámina de corriente, de forma anular, comienza a moverse en la dirección axial (Figura 1.4) debido a la fuerza de Lorentz asociada al campo magnético azimutal generado por la corriente circulante. Dadas las características del circuito LC serie que se tiene, la corriente que circula por la lámina se va incrementando a medida que esta avanza. En este movimiento la lámina va ionizando los átomos del gas formándose así una lámina de plasma (Figura 1.5). Como el campo magnético no es uniforme (decrece a medida que aumenta la coordenada radial) la fuerza no es constante sobre toda la lámina y distintas porciones de la misma avanzan a diferentes

velocidades. Las velocidades que adquiere la lámina son supersónicas por lo cual se forma una onda de choque en el frente de la misma. Debido a este fenómeno el gas de llenado ubicado delante de la lámina no ve modificadas sus características de densidad y presión. La lámina de corriente se mueve sin sufrir deformaciones apreciables y los valores de las velocidades de la misma están entre  $10^4$  y  $10^5$  m/s.

**Desborde de la lámina y barrido radial:** Al llegar al extremo de los electrodos (Figura 1.6), la lámina desborda y se incurva adquiriendo una componente de movimiento radial adicional. Es decir parte de lámina continua con el desplazamiento axial y la restante empieza su movimiento hacia el eje del Plasma Focus (Figura 1.7). Siempre sujeta a la acción del campo magnético azimutal parte la lámina se acelera hacia el eje (Figuras 1.8 y 1.9) tendiendo a conformar un cilindro de plasma para su posterior implosión.

**Compresión:** Como resultado de la violenta implosión de la lámina de corriente (Figura 1.10), se forma un cilindro de plasma de alta densidad y energía denominado foco o pinch. Las dimensiones de este cilindro son aproximadamente un centímetro de longitud y un milímetro de radio. Esta estructura cambia rápidamente observándose estrangulamientos debido a inestabilidades, comportamiento típico del plasma. Finalmente se observa la aparición de una burbuja semiesférica cuya expansión termina por disgregar el sistema. Esta implosión eleva la temperatura y en caso que el gas utilizado sea deuterio o deuterio - tritio, la misma alcanza valores del orden de las necesarias para activar reacciones de fusión termonuclear de los elementos mencionados. De esta manera es posible generar un pulso ultracorto de neutrones de gran intensidad. La cantidad total de neutrones emitidos en cada descarga depende, aparte de una buena focalización del pinch, de la energía almacenada en el banco de capacitores. Las energías de los bancos de PF existentes en la actualidad van desde unos pocos KJ hasta cientos de KJ. Los valores típicos de corriente de descarga están entre 100 KA y 10MA. Los tiempos de colapso, medidos desde la descarga, son del orden del  $\mu$ s mientras que la duración del pulso de neutrones es de aproximadamente cientos de ns.

## SISTEMAS Y SUB-SISTEMAS DE UN PLASMA FOCUS

En la Figura 2 se muestra un esquema típico de conexión entre los componentes necesarios para la operación de un Plasma Focus. Para entender mejor la estructura de estos dispositivos se puede dividir al Plasma Focus en sistemas y subsistemas. Se definirán dos sistemas: Cámara y Capacitores y conectados a estos una serie de subsistemas. En la Figura 3 se esquematiza esta división.

El sistema Cámara está compuesto por la cámara propiamente dicha junto con el par de electrodos más el aislante. Al sistema Cámara están conectados tres subsistemas: carga, vacío y monitoreo. El subsistema carga lo compone el tanque de gas con el cual se llena la cámara. El subsistema vacío lo conforma la o las bombas de vacío. El subsistema de monitoreo esta compuesto por todo el conjunto de sensores (de presión, de tensión, de corriente, de neutrones y de rayos X)

El sistema Capacitores lo constituye el banco de condensadores a ser descargado en el sistema Cámara. Con el sistema Capacitores se comunican los subsistemas fuente y disparo. El primer subsistema lo forma la fuente de alta tensión para cargar los capacitores.

El segundo subsistema lo compone la llave de disparo con la cual se activa la descarga del banco de capacitores sobre la cámara.

Los equipos Plasma Focus existentes en la actualidad, en diferentes laboratorios del mundo, cubren un espectro bastante amplio, tanto en las dimensiones geométricas de los equipos como en las energías de sus bancos de capacitores.

En la Figura 4 se muestran las fotografías de dos equipos. Uno relativamente pequeño como el GN1 [2], Plasma Focus del Laboratorio de Física del Plasma de la UBA, cuyos electrodos tienen dimensiones del orden de unos pocos centímetros y con un banco de capacitores de 4,7 KJ. El otro es un Plasma Focus de 1.2 MJ ubicado en el Instituto de Física del Plasma y Microfusión Laser (IFPML) de Polonia, cuyas dimensiones características de los electrodos son de algunos metros. En la fotografía se puede observar un operario dentro de la cámara.

## **COMPETITIVIDAD DEL PLASMA FOCUS**

En el mercado actual, de fuentes neutrónicas y de rayos X, los equipos Plasma Focus son competitivos por tener un bajo costo, ser portables y también no contaminantes. A continuación explicaremos brevemente cada una de estas características. Para ello, en la Figura 5 se presentan fotografías de los principales componentes de un dispositivo Plasma Focus en su secuencia de montaje.

De los componentes presentados, en la fotografías de la Figura 5, los de mayor costo son los capacitores y la fuente de alta tensión, pero que tienen la ventaja de ser productos comercialmente disponibles. Frente a estos el costo de construcción de la cámara y los electrodos es despreciable ya que se encuentra dos órdenes de magnitud por debajo. El costo total de un equipo Plasma Focus está estimado en aproximadamente \$ 30000. Para muchas aplicaciones, como ser radiografías médicas y neutrografías, esto lo presenta como una alternativa válida frente a las fuentes utilizadas en la actualidad como reactores de investigación, aceleradores y equipos de rayos X convencionales.

Dentro del bajo costo está inmersa la característica del relativamente fácil montaje comparado con el de otras fuentes de radiación. En la Figura 5.1 se detallan los principales componentes a ser montados. En la siguiente se ve al aislante de pirex montado sobre la base para los electrodos. En los dos pasos siguientes se colocan los electrodos interno y externo, en este caso ambos de cobre, bien centrados y cilíndricos. Esta configuración se coloca dentro de una cámara de vacío de acero inoxidable. Los electrodos luego se conectan al banco de capacitores. En la última fotografía se puede ver el producto final incluida la fuente de alta tensión.

Asimismo, se puede ver en la Figura 5, que los componentes de la cámara, tienen tamaños que están dentro del orden de los centímetros mientras que para el banco de capacitores las dimensiones características están alrededor del metro para energías del orden de decenas de KJ. Con estos valores se puede asegurar la portabilidad del sistema, lo cual hace que los Plasma Focus ocupen un vacío de innumerables aplicaciones. Entre ellas se pueden mencionar la prospección y detección de sustancias de bajo número atómico mediante iluminación neutrónica; aplicaciones que, sin la característica de portabilidad del sistema detector, son prácticamente inviables económicamente.

Uno de los grandes problemas que tiene la industria nuclear en general es la poca aceptación dentro de la opinión pública. Los dispositivos Plasma Focus pueden llamarse no contaminantes ya que, a diferencia de las fuentes isotópicas, no emiten radiación mientras están apagados. Además, mientras se encuentran en operación, los pulsos que emiten son ultracortos con tiempos del orden de las centésimas de microsegundo.

A partir de lo recién expuesto se está en condiciones de asegurar que los pulsores Plasma Focus están entre las máquinas de generación de neutrones más baratas, ocupando un nicho tecnológico diferenciado por su carácter no contaminante, su portatibilidad y las características únicas de pulsos intensos y ultracortos de neutrones y fotones.

## **APLICACIONES CON LA TECNOLOGÍA PLASMA FOCUS**

Las aplicaciones utilizando los equipos Plasma Focus son varias y diversas. Dentro de las mismas se pueden mencionar las radiografías no convencionales [3] y la posterior reconstrucción tomográfica [4], la detección no intrusiva de sustancias de bajo número atómico [5] y las neutrografías, entre otras.

***Radiografía no convencional y tomografía:*** El Plasma Focus es utilizado como fuente de rayos X. La muestra a ser radiografiada es colocada en el eje de simetría del cabezal Plasma Focus y detrás de la muestra se ubica la placa radiográfica. Para monitorear la señal de R-X se utiliza un tubo fotomultiplicador. Las señales que se obtienen son de hasta 1,6 V aproximadamente. Estas señales son utilizadas después del disparo para decidir si se revela o no la placa. En la Figura 6 se muestran fotografías de dos radiografías obtenidas con el Plasma Focus GN1 de 4.7 kJ operado a 30 kV. A la izquierda se muestra la radiografía de una placa de Aluminio con un tornillo de bronce colocado dentro de la misma. A la derecha se muestra la radiografía de un conector BNC en forma de T. Como se puede apreciar la calidad de las mismas es notable. Tomando varias de estas radiografías para la muestra colocada en diferentes ángulos es posible hacer una reconstrucción tomográfica. Los campos en los cuales es posible desembarcar con esta aplicación van desde la radiografía industrial hasta la medicinal ya que al tratarse de una fuente pulsada (cada pulso dura alrededor de 300 ns) los riesgos radiológicos son prácticamente nulos.

***Detección de sustancias de bajo peso atómico:*** La detección de sustancias prescindiendo de la extracción y posterior análisis de muestras y también de la introducción de sondas u otros instrumentos de medición es de indudable interés en numerosos campos de aplicación, tales como seguridad (detección de sustancias peligrosas); economía y agroindustria (medición de humedad en suelos y semillas); y minería (prospección de petróleo) entre otras. Conceptualmente el método consiste en emitir un pulso de neutrones empleando un Plasma Focus ubicado en las cercanías de la región que se desea explorar, y emplear dos detectores de neutrones: uno para sensar los neutrones dispersados por la sustancia cuya presencia se desea detectar y otro para tener un registro de la cantidad de neutrones que se emitieron en dicho pulso. La comparación entre las lecturas de ambos detectores permite determinar, en primer lugar, si la sustancia investigada se encuentra presente o no y también a que distancia esta ubicada, en que cantidades se encuentra y , utilizando detectores adecuados, también la geometría espacial que tiene la misma [6].

***Neutrografías:*** Básicamente al iluminarse un objeto con neutrones termalizados la reacción de los mismos con las distintas sustancias que lo componen es también diferente.

Por lo tanto si uno coloca una placa de una sustancia adecuada, esta debería quedar impresionada formando una imagen del objeto. Con el desarrollo de esta aplicación se podrían realizar neutrografías de piezas en movimiento debido a la corta duración del pulso que es de aproximadamente 300 ns.

Actualmente en el PLADEMA se encuentran en operación cuatro equipos de focalización de plasma los cuales se utilizan tanto para la investigación básica como para la aplicada.

## CONCLUSIONES

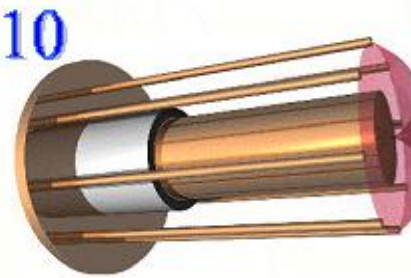
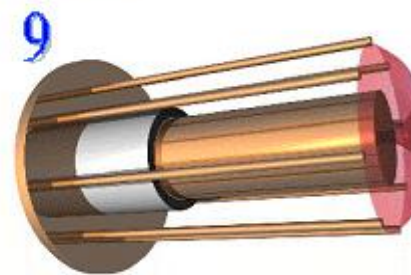
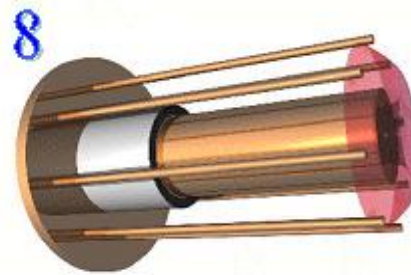
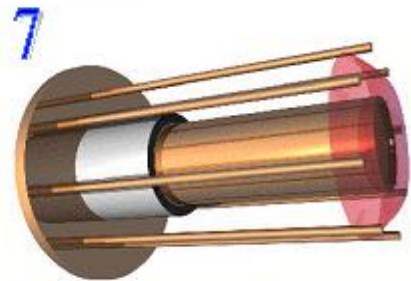
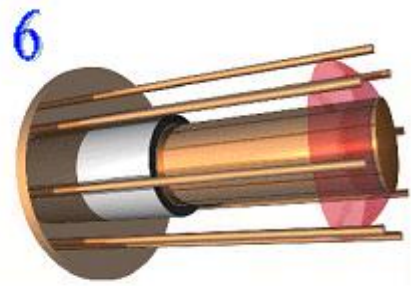
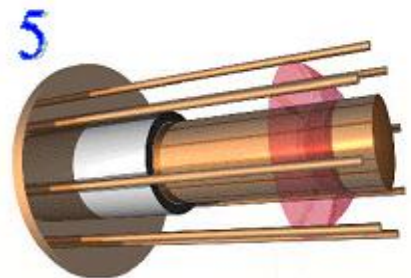
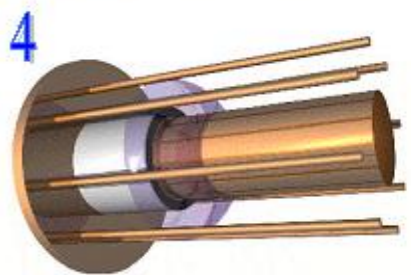
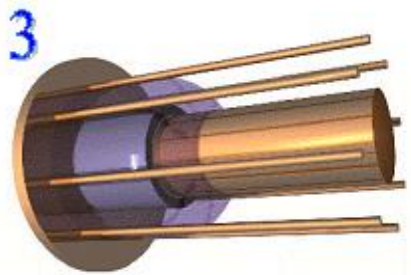
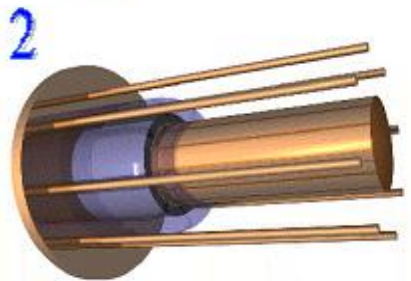
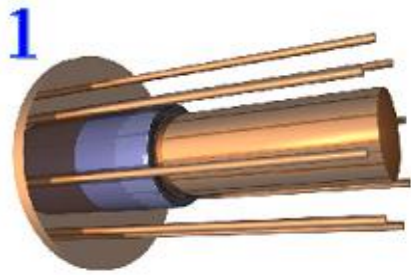
Se puede asegurar que los pulsores Plasma Focus están entre las máquinas de generación de neutrones más baratas, ocupando un nicho tecnológico diferenciado por su carácter no contaminante, su portabilidad y las características únicas de pulsos intensos y ultracortos de neutrones y fotones.

También se puede decir que los equipos Plasma Focus cubren un espectro bastante amplio, tanto en las dimensiones geométricas de los equipos como en las energías de sus bancos de capacitores, lo que los hace utilizables para las más diversas aplicaciones, dentro de las cuales se pueden mencionar las radiografías no convencionales, la detección no intrusiva de sustancias de bajos numero atómico y las neutrografías entre otras.

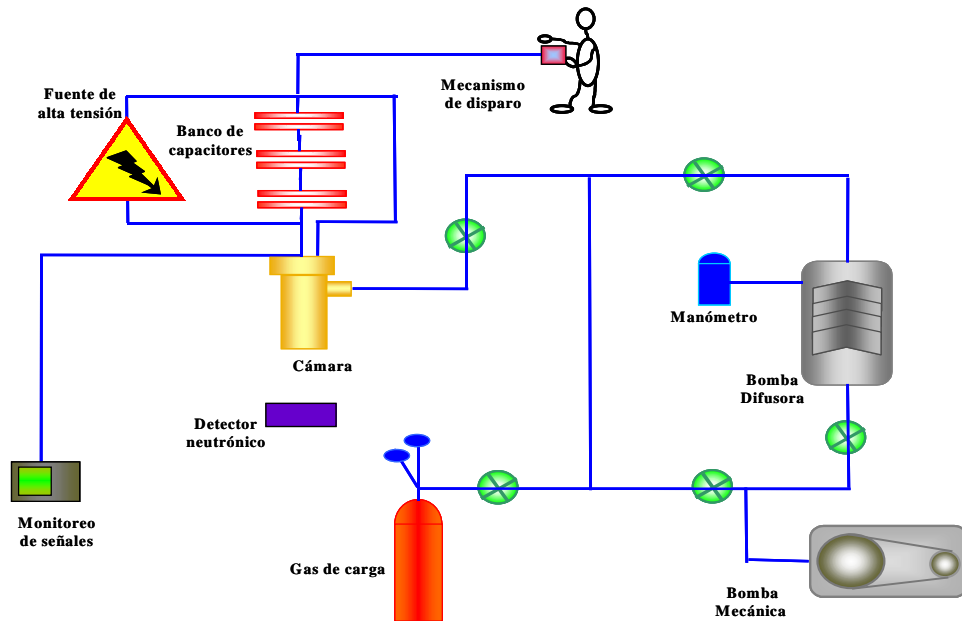
## REFERENCIAS

- [1] Clause A. Los Pulsores Termonucleares. Revista CNEA. Nro 1. 2001.
- [2] Moreno C., Clause A., Martínez J., Gonzalez J. H., Bruzzone H., Llovera R., Tartaglione A. and Jaroszewicz S. Operation and output characteristics of a small-chamber plasma focus. *Regional Meeting on Plasma Research in 21st Century*. Bangkok, Thailand, In Press, May 2000.
- [3] F. Castillo-Mejia, M. Milanese, M. Moroso, J. Pouzo and M. Santiago. Research on Dense Plasma Focus Hard X-Ray Emission with Scintillator-Photomultiplier and TLD Measurements, 1998 ICPP and 25 EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, 22C, 2686 (1998).
- [4] M. Gibbons, W. Richards and K. Shields. Optimization of neutron tomography for rapid H concentration inspection of metal castings, LLNL Rep UCRL-JC-129723, (1998).
- [5] F. Brooks, A. Buffler, M. Allie, K. Bharuth-Ram, M. Nchodu and B. Simpson. Determination of HCNO concentrations by fast neutron scattering analysis, Nuclear Instruments and Methods Sect. A (410) 2, 319-328 (1998).
- [6] C. Moreno, A. Clause, H. Bruzzone, J. Martínez, R. Llovera, and A. Tartaglione. Small-chamber 4.7 kJ Plasma Focus for applications, . Meeting on Plasma Research in 21<sup>st</sup> Century. Bangkok, Thailand, In Press, May (2000).

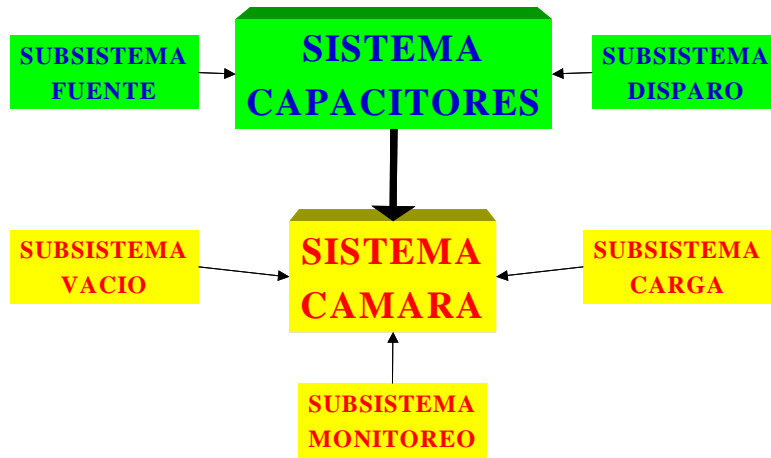
FIGURAS



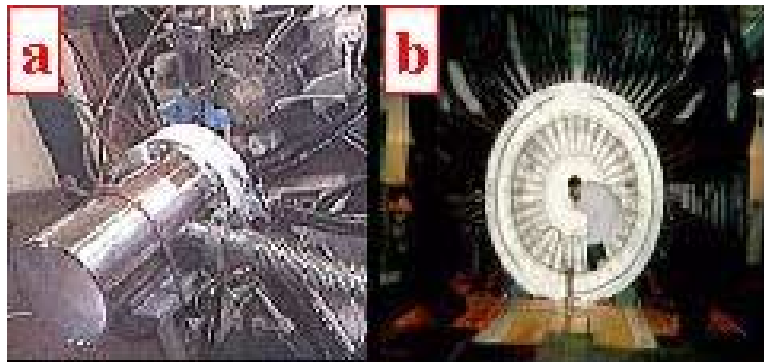
**Figura 1** – Simulación computacional de la formación del foco de plasma



**Figura 2** - Operación de un Plasma Focus

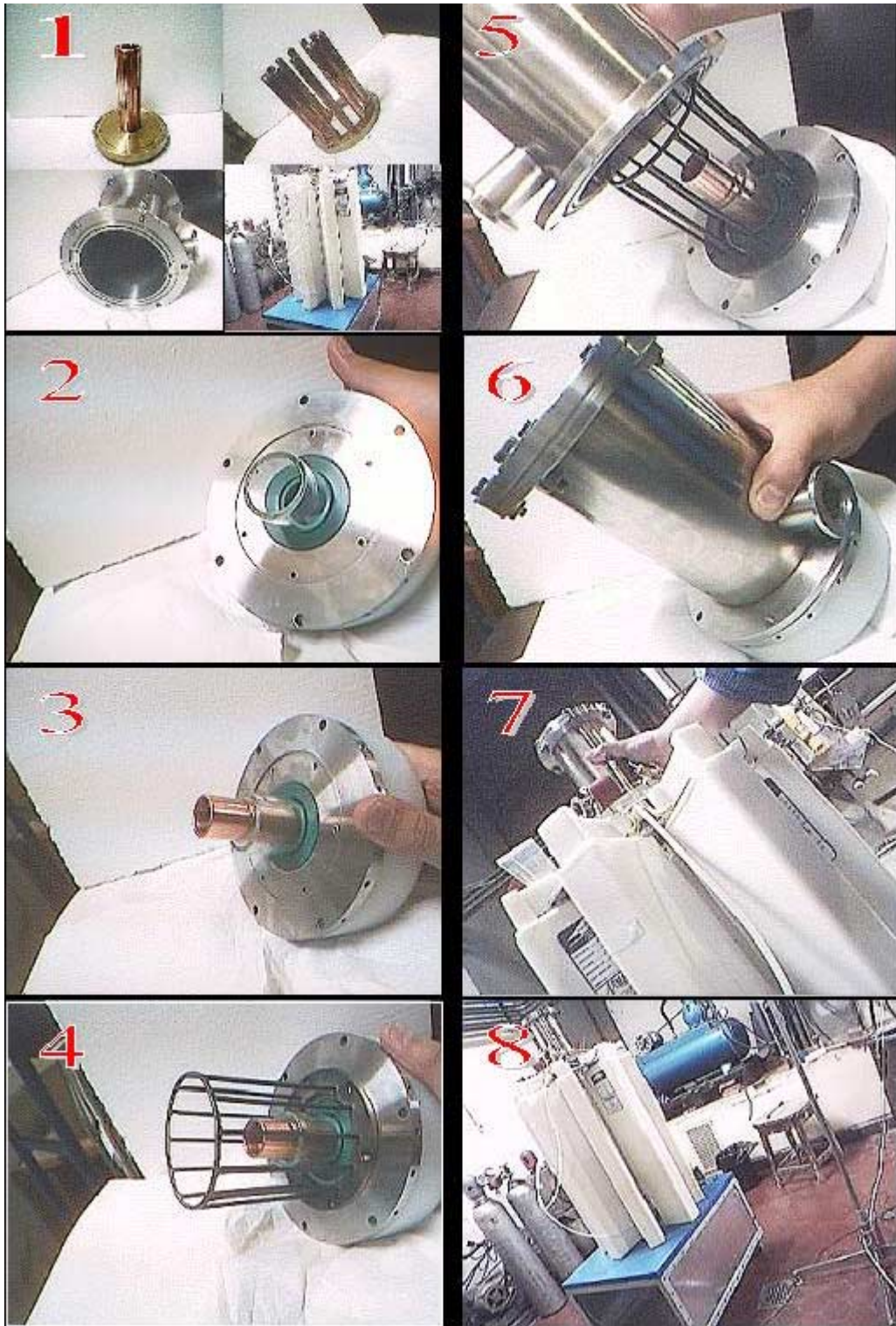


**Figura 3** – Sistemas y subsistemas de un Plasma Focus

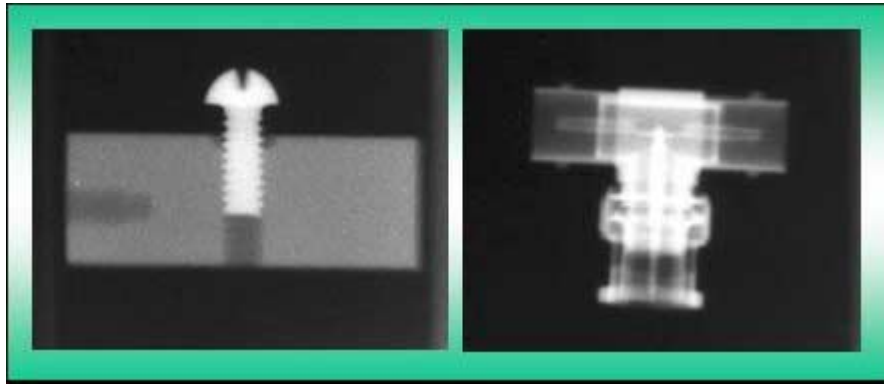




**Figura 4** – a) PF GN1-INFIP - Argentina. b) PF del IFPML de Polonia.



**Figura 5** – Componentes y secuencia de Montaje de un Plasma Focus



**Figura 6** – Radiografías utilizando como fuente de R-X un Plasma Focus