

Diseño de un banco de pruebas para un reactor de plasma de hidrógeno

Design of a test-bench for a hydrogen plasma reactor



Ana Megía-Macías

Universidad de Deusto. Facultad de Ingeniería. Dpto. Mecánica, Diseño y Organización Industrial. Avda. de las Universidades, s/n – 48007 Bilbao

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8657> | Recibido: 20/11/2017 • Evaluando: 22/11/2017 • Aceptado: 01/02/2018

ABSTRACT

• The ion sources are machines capable of producing beams of charged particles. They are widely used in the industrial field where their applications range from ionic implantation in semiconductors or medical treatments against cancer to satellite engines known as thrusters. Ionic implantation in non-conductive materials is also a large industrial field in which ion sources play a fundamental role [1]. All ion sources generate a physical plasma from which the ions are then extracted to form a beam. The characteristics of this type of machines in terms of reliability, efficiency and reproducibility as well as the characteristics of the particle beams extracted from them are closely linked to the parameters of the plasma they generate and those depend strongly of the engineering design of the machine.

This paper shows the design of a test-bench built with the purpose of studying the influence of the engineering design of a plasma reactor on its characteristics and, consequently, on the particle beams that can be extracted from it. The test-bench, which has been called TIPS: Test-bench for Ion Sources Plasma Studies, consists of an ECR-type plasma reactor (Electron Cyclotron Resonance) that has undergone important structural modifications to give it the flexibility that an engineering experimental study requires.

• **Keywords:** plasma reactor, ion source engineering.

RESUMEN

Las fuentes de iones son máquinas capaces de producir haces de partículas cargadas. Son equipos ampliamente utilizados en el ámbito industrial cuyas aplicaciones van desde la implantación iónica en semiconductores o los tratamientos médicos contra el cáncer a los motores de satélites conocidos como *thrusters*. La implantación iónica en materiales no conductores constituye, también, un amplio campo industrial en el que las fuentes de iones juegan un papel fundamental [1]. Todas las fuentes de iones generan un plasma físico del que luego se extraen los iones para formar un haz. Las características de este tipo de máquinas en cuanto a fiabilidad, eficiencia y reproducibilidad así como las características de los haces de partículas que se extraen de las ellas están íntimamente ligadas a los parámetros del plasma que generan y, éstos a su vez, dependen en gran medida del diseño ingenieril de la máquina.

En este trabajo se muestra el diseño de un banco de pruebas construido con la finalidad de estudiar la influencia del diseño

ingenieril de un reactor de plasma en las características del mismo y, en consecuencia, en las de los haces de partículas que del él puedan extraerse. El banco de pruebas, que se ha llamado TIPS: Test-bench for Ion Sources Plasma Studies, consiste un reactor de plasma de tipo ECR (Electron Cyclotron Resonance) que ha sido sometido a modificaciones estructurales importantes para dotarlo de la flexibilidad que un estudio experimental de ingeniería requiere.

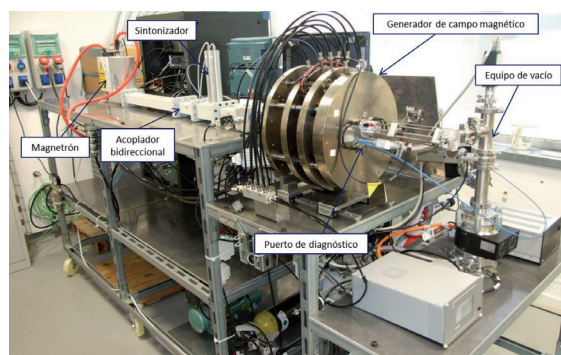
Palabras clave: reactor de plasma, ingeniería de fuentes de iones.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversos tipos de fuentes de iones en función de la tecnología que utilizan para producir plasma [2]. Entre las más utilizadas están aquellas cuyo reactor utiliza láser, descargas eléctricas, microondas o radiofrecuencia como fuentes de energía para ionizar un gas y producir plasma [3], [4], [5], [6], [7]. En este trabajo se presenta el diseño de un reactor de plasma de tipo ECR (*Electron Cyclotron Resonance*) para ser usado como banco de pruebas en el que ensayar nuevos desarrollos que permitan avanzar en la ingeniería de este tipo de reactores de plasma. Se ha elegido este tipo de reactor porque es uno de los más comúnmente utilizados en la industria dada su alta versatilidad.

Son varias las características que hacen tan versátiles a este tipo de fuentes [8], [9]. Quizás la más importante de ellas es su capacidad de producir haces de corriente continua de cualquier elemento con intensidades suficientes tanto para la industrial como para la investigación nuclear. Además las fuentes ECR producen el plasma sin que existan electrodos y, en consecuencia, el único elemento que se consume es el propio combustible inyectado en la fuente. El hecho de que no exista un cátodo que se deteriore y sea necesario reemplazar permite a las fuentes funcionar durante largos periodos de tiempo sin interrupción y evita la contaminación del plasma. El mantenimiento necesario es mínimo y consiste, habitualmente, en la reparación ocasional de elementos del equipo de vacío, hornos externos o equipamiento eléctrico.

Las aplicaciones industriales que utilizan haces de partículas demandan cada vez intensidades de corriente más altas [10]. En general, la densidad de corriente que se puede extraer de una fuente de iones es proporcional al producto de la densidad de electrones por la raíz cuadrada de la temperatura de los mismos (proporcional a la energía que se les transfiere). En consecuencia, si



se desea aumentar la corriente obtenida de la fuente será necesario aumentar uno de los parámetros (o ambos) incrementando la potencia de microondas absorbida por el plasma. Este incremento del porcentaje de energía de las microondas que se deposita en el plasma es un problema que requiere un desarrollo tecnológico que no puede abordarse sólo desde el punto de vista teórico. La complejidad de las ecuaciones que rigen el comportamiento del plasma hace que ni siquiera los mejores códigos de simulación puedan predecir los parámetros del mismo. Se hace, por tanto, indispensable contar un banco de pruebas que permita validar los desarrollos llevados a cabo y que cuente con las herramientas de diagnóstico necesarias para determinar el impacto de los mismos en las características del plasma. Con esta finalidad de diseño y construyó el banco de pruebas que se describe en el presente trabajo.

2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR

Los reactores de plasma ECR funcionan inyectando microondas en una cámara de plasma en la que se genera una resonancia y que se encuentra llena de un gas a baja presión. La cámara de plasma de un reactor de microondas debe ser una cavidad resonante en la que se produzca un máximo de campo eléctrico capaz de comunicar a los átomos la energía suficiente para que se ionicen. El diseño más habitual, y así es también en el caso de TIPS, es optar por una cavidad cilíndrica. Las frecuencias de resonancia de una cavidad cilíndrica se calculan como [11]:

$$f_{nml}^{TE} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz, ϵ_r y μ_r son, respectivamente, la permitividad eléctrica y magnética relativas del material que llena la cámara (en el caso del vacío $\epsilon_r = \mu_r = 1$), a es el radio de la cámara, d su longitud y p'_{nm} es el cero de orden m de la primera derivada de la función de Bessel de orden n . Los índices n , m y l identifican el patrón del modo de resonancia (TE_{nml}).

Los reactores como TIPS se conocen como ECR porque operan a una frecuencia conocida también como ECR por sus siglas en inglés: "Electron Cyclotron Resonance" que hace referencia a la resonancia electrónica de ciclotrón. Los electrones inmersos en un campo magnético se mueven trazando círculos en un plano perpendicular al campo debido a la fuerza de Lorentz, la frecuencia angular de este movimiento es la que se conoce como ECR y puede calcularse como [12]:

$$\omega_{ECR} = \frac{eB}{m} \quad (2)$$

Donde e es la carga de electrón, B es el campo magnético y m es la masa del electrón. En un reactor de plasma ECR el campo magnético se elige de modo que esa frecuencia angular de los electrones sea igual a la frecuencia de la microonda. Si se dan estas dos condiciones la transferencia de energía de las microondas a los electrones se maximiza, favoreciendo las colisiones entre estos y los átomos neutros e iones presentes en la cámara de plasma y aumentando, por tanto, el número de eventos de ionización, es decir, la densidad del plasma.

3. DISEÑO DEL REACTOR

La Figura 1 muestra una vista de sección del reactor de plasma donde se pueden apreciar los principales subsistemas. La cámara de plasma (a) fue diseñada en base a la ecuación (1) como una cavidad cilíndrica de cobre libre de oxígeno (OFHC) en la que el modo de resonancia de tipo transversal eléctrico (TE) TE_{111} se produce para una frecuencia de 2.45 GHz. Bajo esta premisa, se llegó a unas dimensiones de 90 mm de diámetro y 93 de longitud. En la pared de la cámara de plasma hay cuatro conductos por los que fluye agua desionizada procedente de un circuito de refrigeración cuya temperatura es regulable. El acoplamiento de las microondas en la cámara de plasma se realiza a través de un acoplador de latón de 280 mm de longitud (b) compuesto de cinco tramos escalonados consecutivos de diferentes tamaños, cada tramo actúa como un adaptador de impedancia de $\lambda/4$ con respecto a los tramos adyacentes. El acoplador se une a un tramo de transición WR284-WR340 de guías de onda de 128 mm de longitud (c) para conectar el acoplador con un soporte que aloja una ventana de cuarzo de 10 mm de espesor (d). Esta ventana separa la parte del equipo que se encuentra bajo vacío del resto de la tubería de microondas que se encuentra a presión atmosférica. Esta zona incluye un acoplador bidireccional (e), usado para obtener una señal de sincronización, un sintonizador de dos pistones (f) para la sintonización fina de la impedancia y un segundo acoplador bidireccional donde se obtienen las señales de potencia transmitida y reflejada (g). Cada uno de estos tres componentes (e-g) tiene una longitud de 173 mm. El magnetrón (que no se muestra en la figura) está conectado al acoplador bidireccional a través de un tramo de guía de onda recto de 610 mm de longitud.

De acuerdo con la ecuación (2), para que se dé la condición de resonancia buscada para una frecuencia de 2.45 GHz se requiere que el campo magnético alcance un valor de 87.5 mT. Para obtener

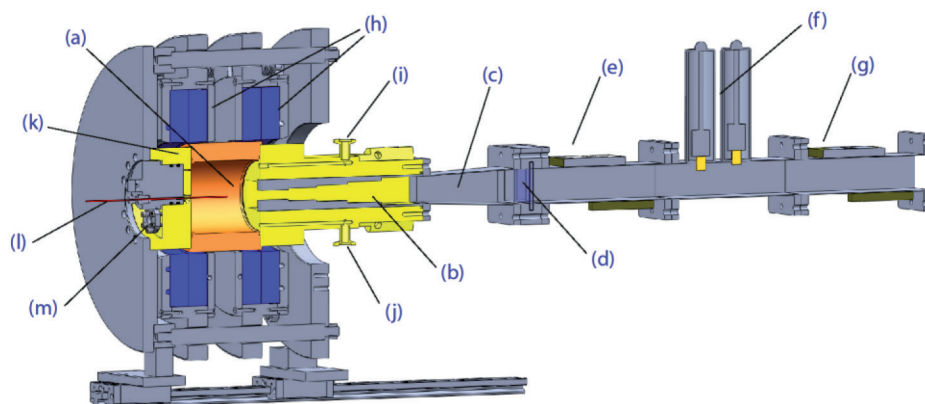


Fig. 1: Vista de sección del generador de plasma de acuerdo a su diseño inicial

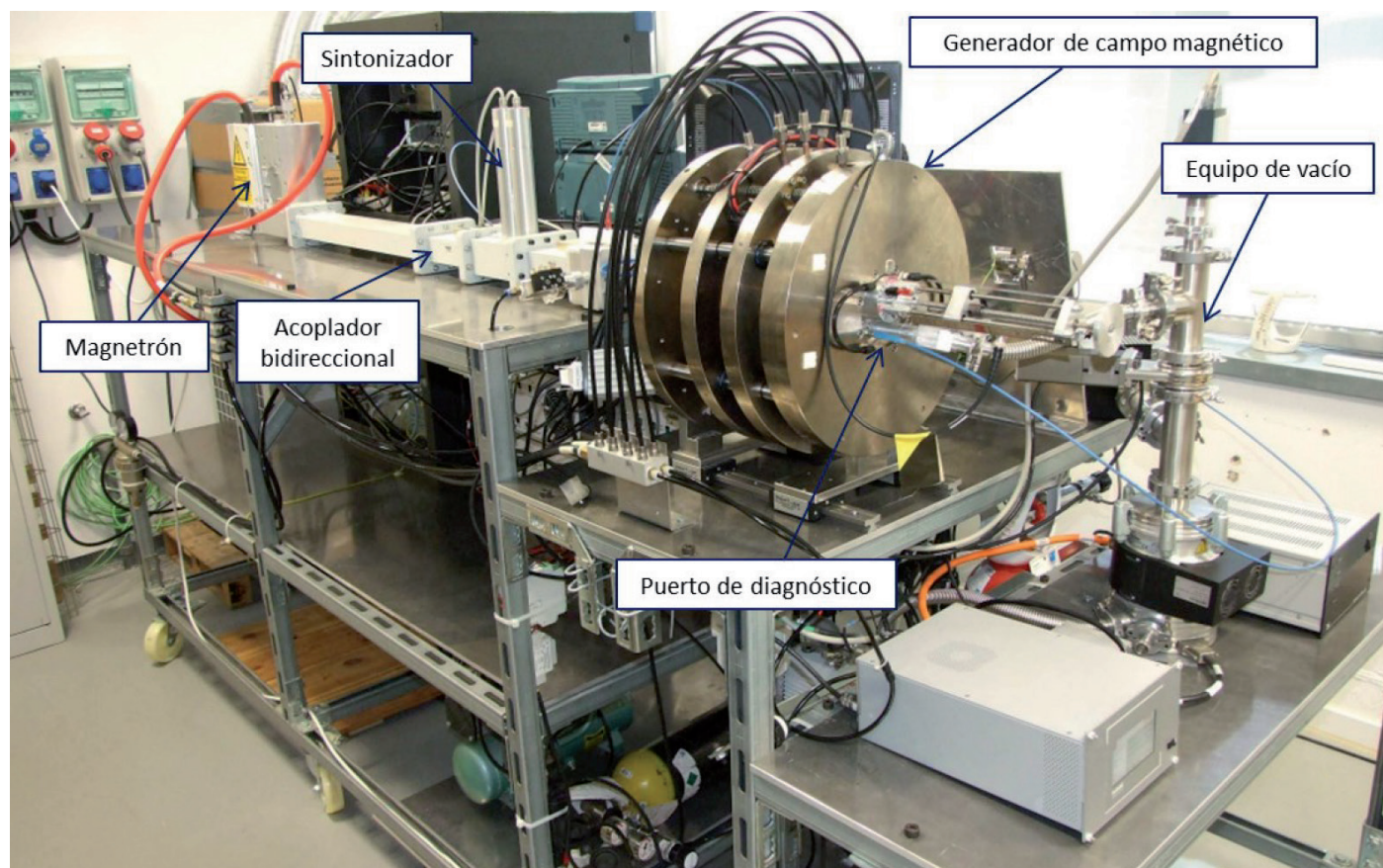


Fig. 2: Vista del reactor de plasma montado sobre el banco de pruebas donde son visibles los principales sistemas anteriormente descritos

este campo magnético en el interior de la cámara de plasma se decidió utilizar un sistema compuesto por cuatro solenoides de cobre capaces de conducir hasta 12 A de corriente eléctrica alojados en dos discos móviles (*h*) que pudiesen desplazarse longitudinalmente a lo largo de la dirección del eje de la cámara de plasma. En los solenoides se usó un conductor hueco que permite la circulación de agua de refrigeración para mantener su temperatura en un rango seguro (por debajo de los 40°C).

Como fuente generadora de microondas eligió utilizar un magnetron industrial como fuente de microondas (marca: Cober Muegge, modelo: MW2000S-250BB), fijando por tanto una frecuencia de 2.45 GHz. Se eligió también una fuente de alimentación para el magnetron que puede operarse en modo continuo o pulsado (entre 100 Hz y 20 MHz con un ciclo de trabajo entre el 10 y el 90%), la potencia es regulable entre 200 y 2000 W y el rizado se mantiene por debajo del 5%. La elección de una fuente de alimentación de potencia y frecuencia de pulsado regulable brinda al banco de pruebas gran flexibilidad y la posibilidad de evaluar el diseño bajo un amplio rango de condiciones de trabajo que resulten representativas de aquellas en las que operan los reactores presentes en las fuentes de iones ECR utilizadas en la industria.

Se inyecta hidrogeno con una pureza del 99.999% de pureza en la cámara de plasma a través de una válvula de aguja conectada a una de las entradas que posee el acoplador de microondas (*i*), un caudalímetro conectado en serie con la válvula de aguja permite controlar el flujo de hidrógeno que entra en la cámara (entre 0.5 y 3 sccm). En la otra entrada del acoplador de microondas (*j*) se conecta un medidor digital de presión de ionización por cátodo caliente. Cada uno de los extremos de la cámara está cubierto por un disco de Nitruro de Boro de 2 mm de espesor. El extremo

de la cámara de plasma opuesto a la entrada de las microondas es el lugar donde se situarían los electrodos de extracción en el caso de querer utilizar el reactor como fuente de iones. En el caso del banco de pruebas se instaló un puerto de diagnóstico (*k*) que se utiliza para conectar el equipo de vacío (compuesto de una bomba de paletas y una bomba turbomolecular de 300l/s conectadas en serie) y como punto de acceso a la cámara de plasma diferentes sistemas de diagnóstico. En la figura 1, a modo de ejemplo, se muestran dos sistemas de diagnóstico simultáneos: una sonda de Langmuir (*l*) que permite la medición de la densidad y la temperatura del plasma y, además, una pequeña ventana de cuarzo (*m*) de 12 mm de diámetro permite la instalación de una fibra óptica conectada a un fotodiodo cuya señal se utiliza para monitorizar el comportamiento del plasma en el interior de la cámara.

La Figura 2 muestra una fotografía del banco de pruebas, en ella puede verse el reactor. Los principales sistemas descritos con anterioridad pueden verse en la imagen.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Las condiciones de funcionamiento del reactor están determinadas por una serie de parámetros que pueden ser modificados de manera independiente. En el caso de TIPS estos parámetros son: potencia, frecuencia de pulsado y ciclo de trabajo del magnetron; distribución de campo magnético en función de la corriente en cada uno de los solenoides y posición de los soportes de los mismos; presión de hidrógeno dentro de la cámara de plasma y posición de los pistones del sintonizador. El rango de valores que puede adquirir cada uno de los parámetros anteriormente establecidos se muestra en la Tabla 1.

	Parámetro	Rango
Magnetron	Potencia	200 - 2000 W
	Frecuencia de pulso	100 - 20000 Hz
	Ciclo de trabajo	10 - 90%
Campo magnético	Corriente en el solenoide 1	1 - 10 A
	Corriente en el solenoide 2	1 - 10 A
	Corriente en el solenoide 3	1 - 10 A
	Corriente en el solenoide 4	1 - 10 A
	Posición del soporte 1	0 - 35 mm
Gas (H)	Posición del soporte 2	60-105 mm
	Presión de hidrógeno	1x10 ⁻⁴ - 5x 10 ⁻⁴ mbar
Sintonizador	Posición del pistón 1	0 - 21 mm
	Posición del pistón 2	0 - 21 mm

Tabla 1: Rangos de los parámetros de trabajo del reactor de plasma

Con el fin de evaluar el funcionamiento del reactor bajo las diferentes condiciones de trabajo y ser capaces de medir la reproducibilidad de los diferentes regímenes de operación, se seleccionaron tres variables a estudiar: la potencia de microondas depositada en el plasma, el tiempo de encendido del mismo y la intensidad luminosa emitida por el mismo. En el caso de la cantidad de energía depositada en el plasma, se puede medir como la diferencia entre la potencia incidente y la reflejada. Ambos valores se pueden medir con resolución temporal por medio de uno de los dos acopladores bidireccionales presentes en la tubería de microondas. La diferencia entre ambas señales es la potencia que se deposita en el plasma. Eligiendo los parámetros de trabajo para maximizar esta potencia absorbida aumentaremos la eficiencia del reactor logrando un mayor grado de ionización y, por tanto, una mayor densidad del plasma.

La pequeña ventana de cuarzo situada en el puerto de diagnóstico se utilizó para conectar una fibra óptica y un fotodiodo que permitiese obtener una señal en función del tiempo proporcional a la intensidad luminosa emitida por el plasma. Este sistema permite, por un lado determinar la duración del tiempo de encendido del plasma y, por otro, tener una señal instantánea fiable de la estabilidad del plasma. Variaciones en la intensidad de la señal, señales ruidosas, inestables o de baja intensidad darán

idea de un plasma inestable o muy poco denso y serán por tanto indeseables para el correcto funcionamiento del reactor.

5. RESULTADOS

Se analizó el funcionamiento del reactor bajo diferentes condiciones de trabajo en términos de estabilidad, de emisión luminosa y de duración del tiempo de encendido del plasma bajo diferentes condiciones dentro de los rangos de trabajo posibles. La figura dos muestra el funcionamiento característico del reactor a través de las señales adquiridas durante su operación. Las figuras muestran señales de potencia incidente (a), potencia reflejada (b) y emisión luminosa (c).

La imagen de la izquierda muestra un pulso completo si se mira la señal de intensidad luminosa puede observarse cómo durante el arranque se produce un incremento rápido (de unos 10 μ s) en coincidencia con el proceso de acoplamiento de las microondas, que se caracteriza por un decaimiento brusco de la potencia reflejada mientras que, posteriormente, la intensidad luminosa sigue evolucionando a un ritmo más lento cuando ya no hay cambios en la señal de potencia reflejada. La ausencia de ruido u oscilaciones en las señales es un indicador de la gran estabilidad del plasma bajo estas condiciones de trabajo.

La imagen de la derecha muestra los mismos datos con una base de tiempo más pequeña de modo que el periodo de encendido del plasma pueda verse con más detalle. Si definimos el tiempo de encendido como el transcurrido desde que se inyectan las microondas en la cámara hasta que la señal luminosa alcanza el 90% de su valor final, podremos establecer que el proceso de encendido dura unos 800 μ s.

Las condiciones de trabajo en las que fueron tomados los datos de la figura 3 con las siguientes: la frecuencia de pulsos fue de 100 Hz y el ciclo de trabajo del 10%, la potencia del magnetron se fijó en 1500 W, la presión en la cámara de plasma fue de 2.5 x 10⁻³ mbar, las posiciones de los pistones del sintonizador fueron 7 mm de penetración en la tubería de microondas en el caso del más cercano a la cámara de plasma y 14 mm en el caso del otro. Sin lugar a dudas, el campo magnético resultó ser el parámetro que mayor influencia tiene en el funcionamiento del equipo. Las combinaciones de corrientes de las bobinas y posiciones de los

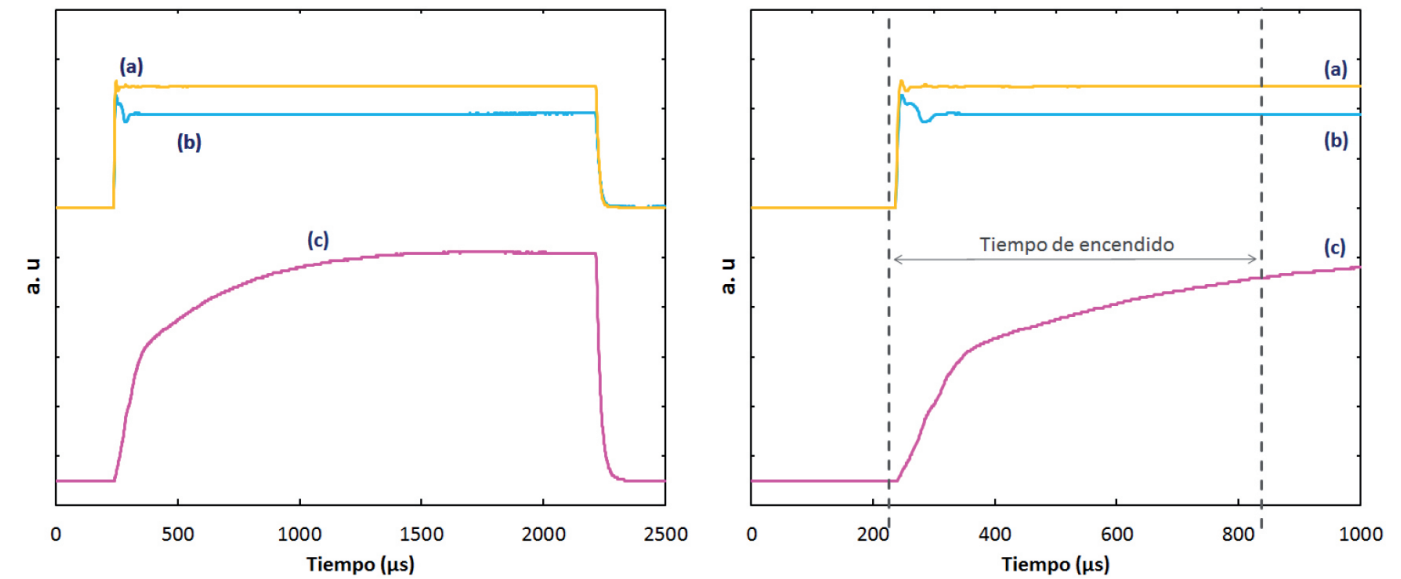


Fig. 3: Resultados característicos de funcionamiento del reactor de plasma: potencia incidente (a), potencia reflejada (b) y emisión luminosa visible (c)

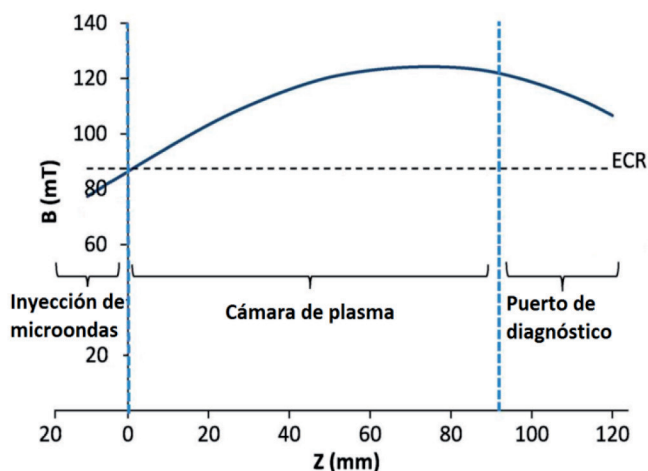


Fig. 4: Intensidad de campo magnético a lo largo del eje de la cámara del perfil de campo que produjo los mejores resultados en el reactor

soportes hacen que se puedan obtener gran variedad de perfiles de campo. Sin embargo, se encontró que el mejor funcionamiento del reactor en términos de emisión luminosa y tiempos de encendido más cortos se da cuando el campo magnético es más intenso en la zona cercana al puerto de diagnóstico y decae hacia la zona de inyección de microondas. Dicho perfil de campo se muestra en la Figura 4 a lo largo del eje de cámara de plasma.

Las características del plasma bajo estas condiciones de trabajo son representativas del funcionamiento de este tipo de reactores. Sin embargo, existen puntos de trabajo que provocan que el plasma se apague, sea inestable o muy poco denso. Se llevó a cabo un estudio sistemático que permitiese acotar los parámetros de trabajo para garantizar la estabilidad del reactor. Para ello se repitieron las mediciones de potencia incidente, reflejada y emisión luminosa a lo largo de los rangos de trabajo descritos en la tabla 1, esto permitió descartar algunas regiones y encontrar puntos de máxima estabilidad como el reflejado en la figura 3. No se detectó influencia de la frecuencia de pulsado ni del ciclo de trabajo por lo que se decidió fijar ambos valores en puntos conservadores desde el punto de vista de la energía puesta en juego para no forzar el rendimiento de los dispositivos. La frecuencia se fijó en 100 Hz y el ciclo de trabajo en el 10% de modo que se trabajó con pulsos de 1 ms de duración. La potencia del magnetron tiene una influencia grande si su valor es bajo, es decir, existen valores de la potencia que no son suficientes para producir un plasma estable y que, por tanto, fueron descartados. Por esta razón se fijó un límite inferior para la potencia de 300 W. La presión de gas debió mantenerse en un intervalo entre 1×10^{-4} y 5×10^{-4} mbar puesto que valores por debajo del mismo impedían que el plasma se encendiese y valores por encima producían un plasma inestable con tendencia a encenderse y apagarse. En el caso del sintonizador, no se observó que las posiciones de los dos pistones tuviesen una gran influencia en las condiciones de plasma aunque sí podían influir en su estabilidad. En general las condiciones de máxima estabilidad se dan cuando el primero se ha introducido entre 9 y 11 mm en la tubería de microondas mientras que el segundo se deja completamente fuera.

6. DISCUSIÓN

Se ha presentado el diseño de un banco de pruebas para fuentes de iones ECR. Se han descrito los parámetros de diseño, las condiciones de trabajo y las características de funcionamiento del

equipo basadas en dos medidas experimentales: el tiempo de encendido y la intensidad de emisión luminosa. Se han determinado los posibles rangos de trabajo para los diferentes parámetros y se caracterizado el comportamiento del reactor.

El banco de pruebas, cuyo primer diseño surgió de una colaboración entre la Universidad de Castilla-La Mancha y ESS Bilbao en 2011 [13], se encuentra en funcionamiento en la Universidad de Castilla-La Mancha y se presenta como una herramienta fiable, funcional y flexible para llevar a cabo investigación e implementar mejoras en la ingeniería del reactor que puedan llevar a mejorar su eficiencia y, en consecuencia, sus posibilidades al ser usado como fuente de iones. TIPS es un banco de pruebas único en España que resultará una herramienta clave puesto que la ingeniería de fuentes de iones es un área en gran medida experimental ya que la presencia del plasma hace muy difícil abordar el estudio de las fuentes de iones mediante simulaciones u otras herramientas analíticas dadas la gran complejidad del modelado del mismo. Las aplicaciones industriales y, más recientemente, las aplicaciones en medicina de estos equipos hacen de TIPS una valiosa herramienta que brinda la posibilidad de llevar a cabo desarrollos ingenieriles de manera segura, rápida y eficaz.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Ishikawa, «Ion sources for industrial applications (invited),» *Review of Scientific Instruments*, vol. 69, nº 2, pp. 863-867, 1998.
- [2] I. G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources*, WILEY-VCH, 2004.
- [3] H. Daido, M. Nishiuchi y A. S. Pirozhkov, «Review of laser-driven ion sources and their applications,» vol. 75, nº 5, p. 056401, 2012.
- [4] I. Brown, «Vacuum arc ion sources: A review,» de 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Tomsk (Rusia), 2012.
- [5] N. Takahashi, H. Murata, H. Kitami, H. Mitsubori, J. Sakuraba, T. Soga, Y. Aoki y T. Katoh, «Development of a microwave ion source for ion implantations,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, nº 2, p. 02C108, 2016.
- [6] M. E. Abdelaziz y S. Zakhary, «Development of radio frequency ion sources and their applications,» de *Proceedings of the Sixteenth National Radio Science Conference. NRSC'99*, El Cairo (Egipto), 1999.
- [7] L. Wartski, C. Schwebel y J. Aubert, «Radio frequency, microwave, and electron cyclotron resonance ion sources for industrial applications: A review (invited),» *Review of Scientific Instruments*, vol. 75, nº 3, pp. 895-900, 1996.
- [8] E. S. Olschewski, «Aplicaciones de la física de plasmas en la industria,» *Ingeniería Industrial*, nº 28, pp. 195-210, 2010.
- [9] M. Muramatsu et al, «Development of a Compact ECR Ion Source for Various Ion Production,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, nº 2, p. 02C110, 2016.
- [10] G. Gaubert et al, «High Intensity ECR Ion Source: SILHI from Research to Industry,» de *Indian Particle Accelerator Conference*, Mumbai (India), 2015.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed, John Wiley and Sons, 2012.
- [12] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas*, IOP Publishing Ltd, 1996.
- [13] A. Megía-Macias, O. D. Cortázar y A. Vizcaino-de-Julián, «Influence of microwave driver coupling design on plasma density at Testbench for Ion sources Plasma Studies, a 2.45 GHz Electron Cyclotron Resonance Plasma Reactor» *Review of Scientific Instruments*, vol. 85,033310, 2014.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al Dr. Daniel Cortázar su colaboración y las útiles discusiones.