

# Acondicionamiento del Stellarator TJ-II durante la Etapa de Plasmas ECRH

D. Tafalla

F.L. Tabarés

*Asociación EURATOM/CIEMAT para Fusión - 77*

**Departamento de Fusión y Física de Partículas Elementales**



Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995  
ISSN: 1135-9420  
NIPO: 402-01-008-3

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S70

WAEFFECTS; GLOW DISCHARGES; PLASMA INSTABILITY; PLASMA DENSITY;  
STELLARATORS; TOKAMAK DEVICES.

## **Acondicionamiento del Stellarator TJ-II durante la Etapa de Plasmas ECRH**

Tafalla, D.; Tabarés, F.L.

32 pp. 16 figs. 20 refs.

### **Resumen**

El acondicionamiento del stellarator TJ-II durante las primeras campañas de operación, sólo con calentamiento ECRH y pared únicamente metálica, se ha basado en la técnica de Glow Discharge (GD). La aplicación de una descarga GD en Helio durante la noche previa al día de operación ha mostrado ser necesaria para tener descargas reproducibles. Sin embargo, el He implantado en la pared durante la descarga GD hace difícil el control de la densidad en las plasmas ECRH. Una descarga GD en argón durante aproximadamente 30 minutos aplicada antes de la operación permite desorber parte de ese He implantado. Con este procedimiento (He GD + Ar GD) se han conseguido plasmas reproducibles y de densidad controlada tanto con  $H_2$  como He.

## **Conditioning of TJ-II Stellarator during the ECRH Plasmas Period**

Tafalla, D.; Tabarés, F.L.

32 pp. 16 figs. 20 refs.

### **Abstract**

The TJ-II stellarator has been conditioned by glow discharge (GD) during the first campaigns of operation, working only with ECR heating and all metal walls. The application of a He GD during the overnight period before the operation has been required in order to obtain reproducible discharges. However, the density control of the ECRH discharges was not possible because of the He implanted on the wall during GD. An short Ar GD ( $\leq 30$  min.) applied before the operation allows desorbes part of the implanted He. By applying this procedure (He GD + Ar GD), reproducible and density controlled plasmas have been achieved in  $H_2$  and He.



## INDICE

INTRODUCCION	7
STELLARATOR TJ-II	9
CAMARA Y SISTEMA DE VACIO DE TJ-II	10
SISTEMA DE GLOW DISCHARGE	12
ACONDICIONAMIENTO DURANTE LA PRIMERA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	13
CALENTAMIENTO DE LA CAMARA DE VACIO (SEGUNDA CAMPAÑA EXPERIMENTAL, 1999)	17
ACONDICIONAMIENTO POR DESCARGAS DE HELIO	19
CONTROL DE DENSIDAD DESPUES DE He GDC	21
DESORCION DE HELIO CON DESCARGAS DE ARGON	24
CONTROL DE PLASMAS TJ-II DESPUES DE LA DESCARGA EN Ar	26
EXPERIMENTOS DE DESORCION TERMICA EN TJ-II	27
CONCLUSIONES	29
REFERENCIAS	30



## INTRODUCCION

La importancia de la interacción del plasma con la superficie de la cámara de vacío (interacción plasma-pared) ha sido destacada desde hace tiempo como uno de los elementos claves en el comportamiento de los dispositivos de fusión por confinamiento magnético (1-4). La fuerte interacción con la materia de los átomos e iones provenientes del plasma da lugar a una serie de procesos (sputtering, erosión química, atrapamiento, reflexión, etc...) en la superficie del dispositivo. Estos procesos afectan al balance de partículas en el plasma (reciclado de hidrógeno) y además inducen la liberación de material de la pared introduciendo impurezas en el plasma. El rango de esta interacción está limitado por la energía de penetración y la naturaleza del material siendo típicamente de varias decenas de nanómetros.

El efecto negativo de las impurezas es doble; por un lado contribuyen a la dilución del plasma de hidrógeno y por otro lo enfrían al hacer aumentar las pérdidas de potencia por radiación. La potencia radiada aumenta fuertemente con el número atómico ( $Z$ ) de la impureza, siendo la pérdida de energía por bremsstrahlung proporcional a  $Z^2$ . Las impurezas liberadas vuelven a la pared múltiplemente ionizadas produciendo un aumento del sputtering y arrancando otras impurezas de mayor  $Z$ . En consecuencia la liberación de impurezas debe conservarse lo mas baja posible desde el inicio del plasma. La cantidad de impurezas tolerables en el plasma depende del tipo de impureza de que se trate siendo el valor de  $Z$ , la probabilidad de atrapamiento en la pared y la capacidad de penetración en el plasma los factores a tener en cuenta.

El particular papel del oxígeno en el mecanismo de generación de impurezas es bien conocido (1). El oxígeno, que es la impureza ligera mayoritaria en las máquinas de fusión con superficies solo metálicas, se origina a partir del gas adsorbido a la superficie ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) o bien a partir de los óxidos metálicos más fuertemente enlazados. El mecanismo de origen predominante es la desorción inducida por las partículas del plasma (1) mientras que la interacción con electrones, fotones y desorción térmica tiene una importancia secundaria. El  $O$  ionizado en el plasma vuelve a colisionar con la superficie y al ser su eficiencia de sputtering muy superior a la de las especies del plasma provoca la liberación de metales de la pared. Es el conocido como "ciclo de oxígeno"

responsable de la contaminación del plasma en este tipo de dispositivos.

Como consecuencia de todo esto se han desarrollado una serie de técnicas de tratamiento de la superficie expuesta al plasma con el propósito de controlar tanto la producción de impurezas en los plasmas de fusión como el reciclado del plasma en la superficie. Son las que conocemos como técnicas de acondicionamiento de pared (1-9) y que se aplican a la generalidad de los dispositivos según las características de los mismos. A continuación se describen brevemente las técnicas más usuales entendiéndose que su aplicación no es excluyente.

**Tratamiento químico.** Con anterioridad a cualquier otro tratamiento de la cámara de vacío, se limpia con una serie de disolventes químicos con el fin de eliminar los restos de hidrocarburos de la superficie.

**Horneado (baking).** El calentamiento de la cámara es una técnica standard cuando se desea alcanzar condiciones de ultraalto vacío. A alta temperatura ( $T > 300^{\circ}\text{C}$ ) la desgasificación de la superficie aumenta drásticamente eliminándose gran parte del  $\text{H}_2\text{O}$  adsorbido.

**Gettering metálico.** Hace uso de la alta probabilidad de atrapamiento de impurezas ligeras que presentan ciertas superficies metálicas limpias (Ti, Cr, Be). Mediante evaporación controlada in situ de dichos metales se obtienen fácilmente películas que cubren grandes áreas convirtiendo la superficie de la cámara en una potente bomba de vacío. La necesidad de renovación frecuente de la película y la inhomogeneidad de la misma en una cámara con fuertes restricciones geométricas son los inconvenientes de esta técnica en los dispositivos de fusión.

**Descargas de limpieza.** Diferentes tipos de descargas de plasma han sido aplicados al acondicionamiento in-situ de dispositivos de fusión. En la actualidad las más extendidas son las de tipo "glow discharge" (GD) (7,8) tanto con corriente continua como con radiofrecuencia. Los plasmas GD se obtienen por descargas en gases a baja presión mediante un ánodo y la cámara actuando como cátodo. De este modo la superficie de la cámara es sometida al bombardeo de los iones del plasma así como de las partículas neutras producidas por disociación y procesos de intercambio de

carga (CX). Los gases empleados mayoritariamente son  $H_2$  y He. En el caso del hidrógeno los efectos de limpieza son producidos por la reactividad del gas (sputtering químico) mientras que con helio los efectos son debidos al sputtering físico.

**Recubrimiento con películas de baja Z.** Mediante técnicas de deposición asistida por plasma se obtiene un recubrimiento de la superficie de la cámara con una película de algún elemento de baja Z: C, B, Li, Si. Además del efecto beneficioso de baja Z, alguno de estos elementos (B) presentan un fuerte efecto de gettering de O. De nuevo la falta de homogeneidad de la película así como su erosión por el plasma y la necesidad de redeposiciones frecuentes son algunos problemas de estas técnicas.

Mientras las dos primeras técnicas son de uso general, la elección de las siguientes (bien aisladas o combinadas) dependerá del dispositivo en cuestión. El material de la pared, todo metal o con partes de baja Z (grafito, Be, B), así como la geometría de la máquina pueden condicionar la elección de técnicas de acondicionamiento.

En este informe describiremos los trabajos de acondicionamiento de la pared del stellarator TJ-II durante las primeras campañas experimentales con calentamiento sólo ECRH (10-12). Como las cargas térmicas a la pared estimadas no hacían necesario el uso de recubrimientos de baja Z se optó por conservar la superficie metálica. Por otro lado la complicada geometría de TJ-II hace difícil y económicamente costoso el uso eficiente de técnicas de gettering de Ti. En consecuencia, el uso de descargas de tipo "glow discharge", principalmente en He, fue elegida como técnica standard para el acondicionamiento del TJ-II durante estas primeras campañas.

## **STELLARATOR TJ-II**

TJ-II es un dispositivo para la investigación de plasmas confinados magnéticamente de tipo stellarator (campo magnético generado enteramente mediante bobinas externas) de 1.5 m de radio mayor (13). En TJ-II el campo ( $B \leq 1.2$  T) es generado por un conjunto de bobinas poloidales, toroidales y verticales. El conductor central, que proporciona una gran flexibilidad (variedad de configuraciones) al dispositivo, consiste en una bobina circular y dos helicoidales envolviéndolo. Los plasmas presentan todos una

típica forma de judía y su tamaño va de 0.1-0.22 m de radio menor dependiendo de la configuración.

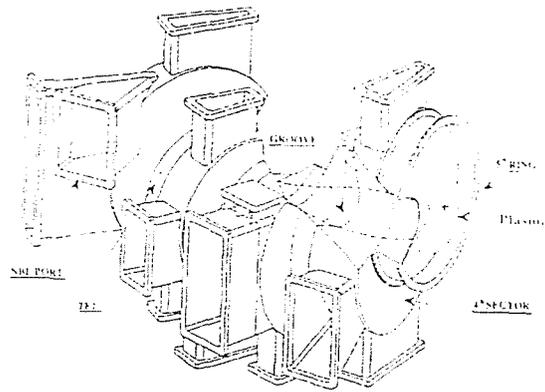
En esta primera etapa de operación los plasmas son producidos y calentados mediante radiación electrónica ciclotrónica (ECRH) a 53.2 GHz. Para ello se cuenta con dos emisores de microondas (gyrotron) y dos líneas de transmisión independientes. La primera línea permite inyección perpendicular de las microondas mientras que la segunda, equipada con un espejo móvil en el interior de la cámara, permite controlar la localización de la deposición de potencia. Cada línea proporciona hasta 300 kW de potencia con lo que se puede alcanzar un máximo de 600 kW. En una segunda etapa, prevista para finales de 2001, el plasma ECRH inicial podrá ser calentado con haces de neutros hasta 2 MW.

Un amplio conjunto de diagnósticos (scattering Thomson, interferómetro, ECE, espectroscopía, haces atómicos, sondas, bobinas magnéticas, etc...) permiten caracterizar los plasmas producidos (14).

## **CAMARA Y SISTEMA DE VACIO DE TJ-II**

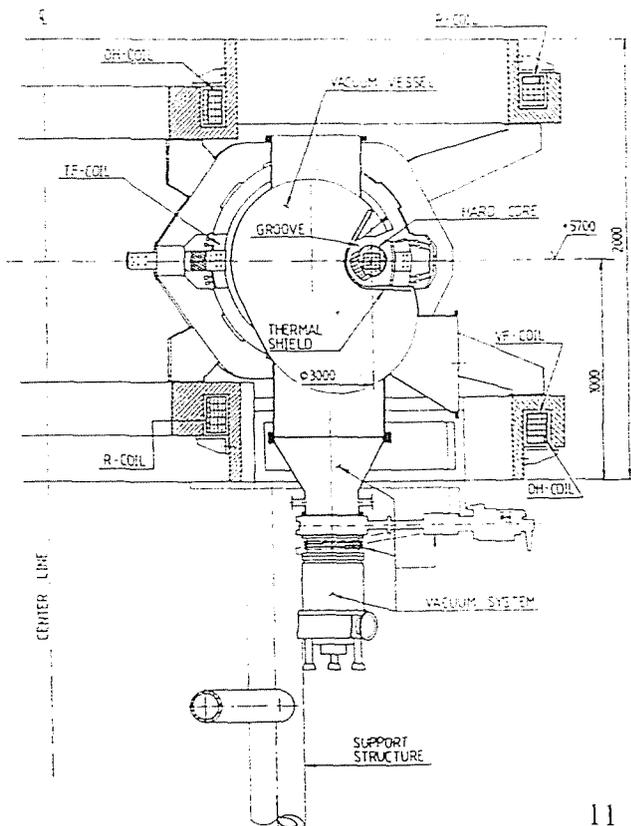
La cámara de vacío de TJ-II, construida en acero austenítico de baja permeabilidad magnética, está compuesta por 32 sectores y 32 anillos distribuidos en cuatro periodos iguales (15). Los sectores soportan las ventanas de acceso y los anillos unen estos sectores y sirven de soporte a las bobinas de campo toroidal (ver figura 1). La conexión entre estos componentes se hizo mediante una soldadura continua en la parte interior. El volumen de la cámara sin diagnósticos es de 6 m<sup>3</sup> y el área interior total aproximadamente 75 m<sup>2</sup>.

La cámara tiene 96 puertas de acceso para diagnósticos, limitadores poloidales, sistemas de calentamiento del plasma y el sistema de vacío. Cada puerta tiene dos tipos de sellado a vacío, una junta metálica de tipo Helicoflex HN 200 de 4 mm de diámetro por el lado interior y una junta de Viton también de 4 mm de diámetro por el lado exterior. Este doble sellado facilita la búsqueda de fugas en cada tapa mediante la inyección de He en el canal que queda entre las dos juntas. La tasa de fuga total de la cámara de vacío después de la soldadura final de los octantes estuvo por debajo de 10<sup>-9</sup> mbar l/s. Toda la cámara es calentable hasta 150 ° C.



*Figura 1. Octante de la cámara de vacío de TJ-II mostrando la típica forma del plasma. El surco (groove) de la cámara permite el acoplamiento del sistema de bobinas centrales.*

El sistema de vacío de TJ-II (16) consiste en un conjunto de 4 bombas turbomoleculares con una velocidad de bombeo nominal de 1600 l/s cada una, simétricamente espaciadas. Las bombas están conectadas a la cámara de vacío a través de puertas inferiores (ver figura 2) y lo suficientemente alejadas como para que los efectos de los campos magnéticos sobre su funcionamiento sean mínimos. La conductancia de dichas puertas se ha procurado hacer máxima consiguiéndose aproximadamente 4760 l/s. Todo el sistema produce una velocidad de bombeo efectiva en la cámara de 4000 l/s. Presiones base típicas del orden de  $10^{-7}$  mbar fueron alcanzadas en las condiciones iniciales (cámara sin calentar).



*Figura 2. Sección transversal del TJ-II mostrando el acoplamiento del sistema de vacío a la cámara.*

En la cámara hay instalado un amplio conjunto de medidores de presión con distintos rangos de medida con el fin de caracterizar el vacío alcanzado. En el rango de ultra alto vacío se emplean manómetros de ionización compatibles con los campos magnéticos mientras que para presiones más altas se emplean manómetros de capacitancia o tipo Pirani.

Para la caracterización del vacío residual mediante espectrometría de masas se empleó un analizador de gases residuales (RGA) de tipo cuadrupolar instalado directamente en la cámara de vacío mediante una conexión de alta conductancia y calentada.

## **SISTEMA DE GLOW DISCHARGE EN TJ-II**

Como ya se ha mencionado, las descargas eléctricas continuas a través de gases enrarecidos, descargas tipo "glow discharge", se emplean frecuentemente en el acondicionamiento de los dispositivos de fusión. En TJ-II el acondicionamiento de la cámara se efectúa mediante una descarga tipo glow en helio (He GD) a presiones del orden de  $5 \times 10^{-3}$  mbar. Para ello se dispone de una fuente de alimentación de alto voltaje en continua ( $V_{\max} = 2000$  V, 4 kW) diseñada y construida en el CIEMAT que se acopla a dos ánodos de acero inoxidable con forma de L a través de una resistencia en serie variable entre 100 y 1000  $\Omega$ . Los ánodos están fijos y aislados de la cámara de vacío que está puesta a tierra y actúa como cátodo. El gas de trabajo se mantiene a la presión deseada mediante un sistema de inyección de gas con retroalimentación (MKS, type 248 control valve) conectado a un manómetro de capacitancia (MKS, Baratron type 317). Para iniciar la descarga es necesario aplicar un voltaje de 1000 V y una corta inyección de argón. Una vez que la descarga está iniciada se corta el flujo de argón y se mantiene en He a presiones de  $5 \times 10^{-3}$  mbar. A esta presión la velocidad de bombeo del sistema de vacío de TJ-II baja hasta 2400 l/s. Para presiones menores, que darían mayores velocidades de bombeo y en consecuencia mayor eficiencia en el acondicionamiento, la descarga glow se vuelve inestable.

El análisis de las especies gaseosas producidas durante el proceso de acondicionamiento se efectúa con un espectrómetro de masas de tipo cuadrupolar (HIDEN, modelo HAL-201E). Un sistema de vacío diferencial y una conexión a la cámara de TJ-II de baja conductancia permiten operar el espectrómetro en condiciones de

alto vacío mientras la cámara principal se mantiene a la presión del acondicionamiento. Todo el sistema está caliente (100-150 °C) durante las medidas para permitir la máxima transmitancia de especies condensables. Con el fin de obtener medidas absolutas de las especies producidas se ha efectuado un calibrado de la transmitancia de todo el sistema para los distintos gases medidos. Este mismo sistema es empleado en el análisis de las especies producidas después de la descarga ECRH en TJ-II (análisis postpulso).

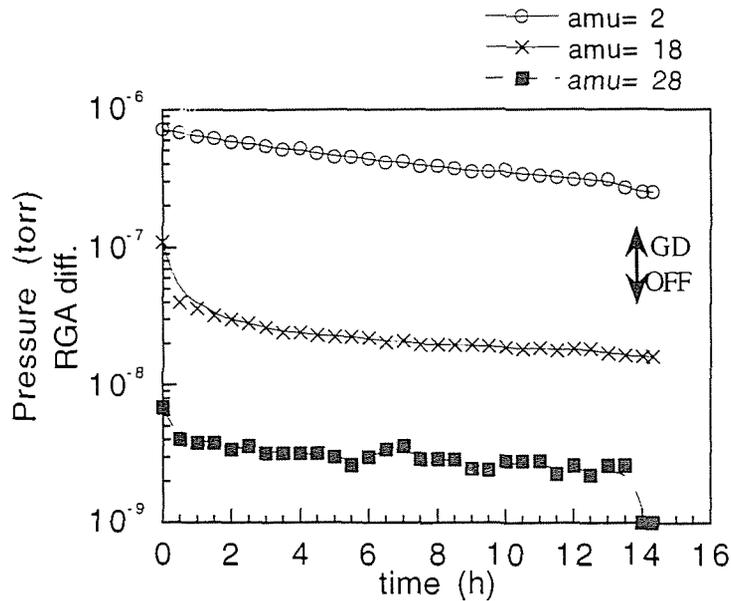
## **ACONDICIONAMIENTO DURANTE LA PRIMERA CAMPAÑA EXPERIMENTAL**

La primera campaña experimental de TJ-II se desarrolló a lo largo del año 1998 contándose solamente con una línea de girotron y por tanto con una potencia máxima de ECRH de 300 kW. En esta campaña no fue todavía posible hacer un calentamiento de la cámara como paso previo al proceso de acondicionamiento. En estas condiciones el vacío residual alcanzó presiones base del orden  $1-2 \times 10^{-7}$  mbar estando limitado por la desorción de  $H_2O$ .

El procedimiento standard de acondicionamiento durante esta campaña fue aplicar una descarga glow en He durante la noche (aprox. 14 h) antes de cada día de operación de TJ-II (10). La corriente total en la descarga se mantuvo en 1 A por ánodo que equivale a una densidad de corriente de  $4 \mu A cm^{-2}$ . La figura 3 muestra la evolución de distintas masas del espectro ( $H_2$ , CO y  $H_2O$ ) durante uno de los primeros procesos de acondicionamiento previo al inicio de la campaña. Puede verse que, aunque todas las masas presentan una cierta evolución durante la descarga, sólo la señal de masa 28 (CO) muestra una clara correlación con el fin de la descarga. Esto indicaría que el principal efecto de la limpieza en esta fase es la eliminación de C y O en forma de CO. La señal correspondiente a  $CO_2$  (masa 44), que no fue registrada en este experimento, también presenta un comportamiento similar aunque los niveles alcanzados son menores que los de CO.

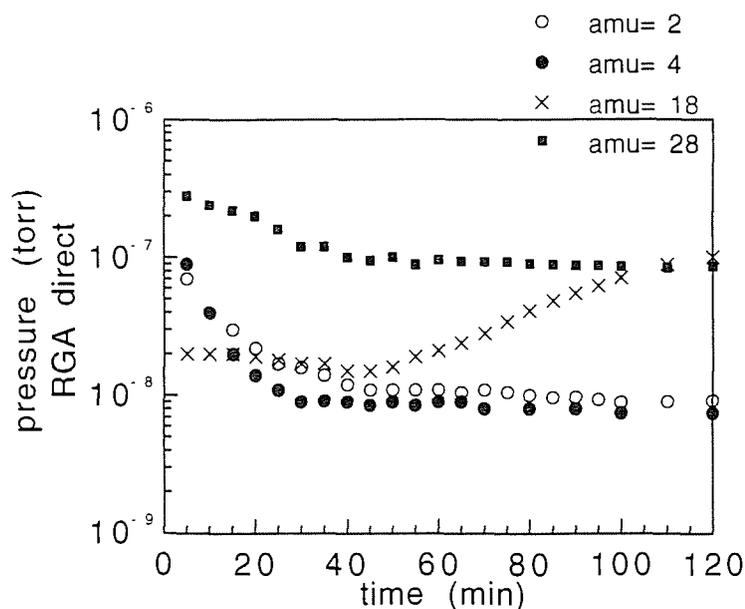
Mediante la integración de la curva de evolución de CO a lo largo del tiempo de la descarga se puede hacer una estimación de la cantidad de C eliminado durante el acondicionamiento. En este caso la integración, introduciendo los factores de calibrado correspondientes, dio valores del orden de 0.9 gr de C eliminados.

Este valor corresponde a un recubrimiento de aproximadamente 30 monocapas de C en la superficie de TJ-II.



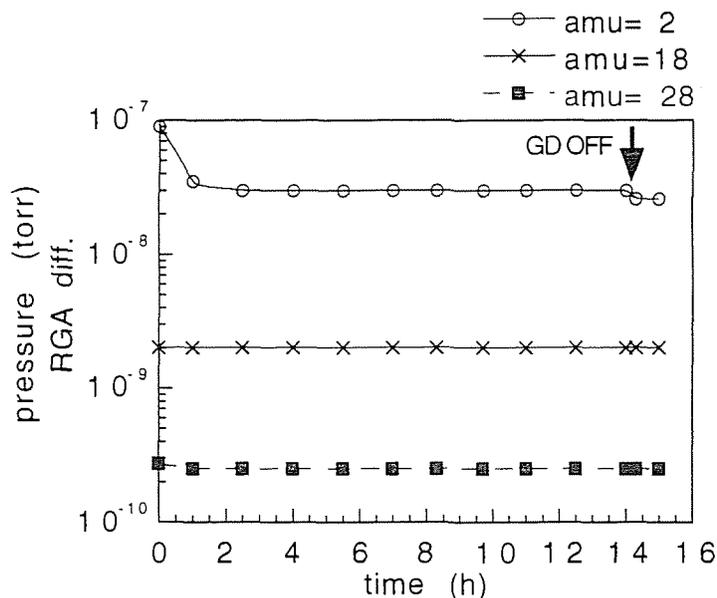
*Figura 3. Evolución temporal de distintas especies durante el acondicionamiento inicial de TJ-II.*

Además de la eliminación de C y O via CO, cuyo efecto va disminuyendo con el paso de los ciclos de acondicionamiento, encontramos una disminución de la presión base en un 10-20% que se ve reflejada en una disminución de las señales de H<sub>2</sub>O (amu 18) y O<sub>2</sub> (amu 32) en el espectro de masas. Como en la figura 3 no se aprecia ningún efecto del glow sobre la masa 18, esta disminución no implica la simple eliminación de H<sub>2</sub>O por la descarga sino más bien un efecto de bombeo por parte de la pared de la cámara que queda activada por la acción de la descarga. Este efecto es temporal y tanto la presión base como los niveles de H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub> se recuperan después de cierto tiempo como puede verse en la figura 4. En estos primeros ciclos de acondicionamiento la recuperación del nivel de H<sub>2</sub>O fue de aproximadamente 2h mientras que el de O<sub>2</sub> fue de 20 h. Estos tiempos fueron incrementándose a medida que la campaña experimental avanzó y la cámara estuvo mejor acondicionada.



*Figura 4. Evolución temporal del vacío residual después del acondicionamiento.*

El efecto acumulado de las descargas de acondicionamiento durante toda la noche y de las propias descargas de plasma caliente durante la operación de TJ-II hace que el acondicionamiento de la cámara mejore a medida que la campaña experimental progresa. Esto es evidente en la figura 5, donde se representa la evolución de una descarga de acondicionamiento hacia el final de la primera campaña de TJ-II. En este caso ninguna de las masas seguidas muestra cambio significativo al apagar la descarga indicando que no hay eliminación de ninguna especie asociada al acondicionamiento. El único efecto asociado a la descarga es la activación de la pared de la cámara y la consiguiente disminución temporal de los valores residuales de  $H_2O$  y  $O_2$ . Este efecto ha demostrado ser importante en el control de los electrones rápidos generados al inicio de la descarga de TJ-II y que condicionan el arranque y posterior desarrollo de la misma.

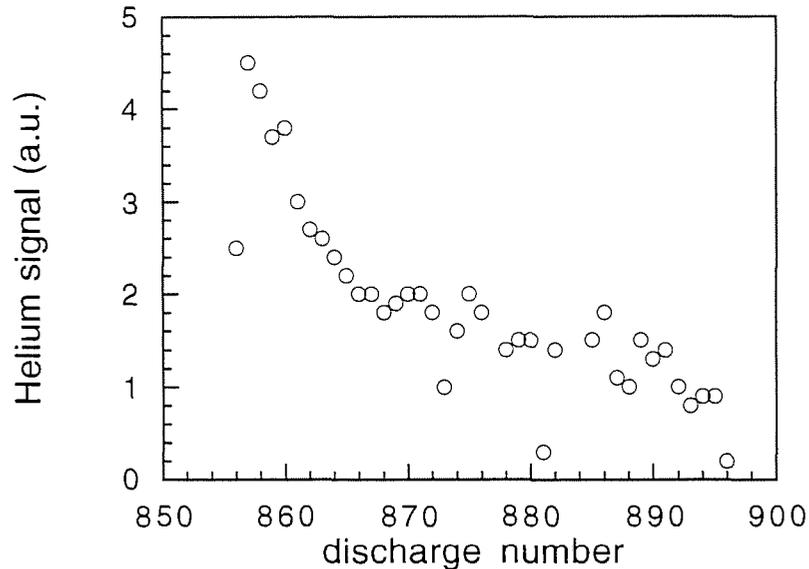


*Figura 5. Evolución temporal de especies características durante una descarga de acondicionamiento al final de la primera campaña de TJ-II.*

La descarga en TJ-II se produce cuando la corriente en el sistema de bobinas alcanza una meseta. Sin embargo, durante la subida de la corriente en las bobinas se producen fuertes campos eléctricos y pueden aparecer superficies magnéticas cerradas permitiendo que electrones libres sean acelerados y confinados. Si la energía alcanzada por estos electrones rápidos es suficientemente alta pueden generar rayos-X por "bremsstrahlung" sobre el gas inyectado, el plasma o la pared. De este modo los electrones rápidos perturban el arranque de la descarga produciendo plasmas difíciles de controlar y además las emisiones de rayos-X producen fuertes perturbaciones sobre algunos diagnósticos. Desde el comienzo de la campaña se encontró una correlación directa entre el nivel de vacío residual y la emisión de rayos-X en la descarga, a mayor presión residual aumentaban las descargas con rayos-X. También se encontró una relación entre descargas con rayos-X y el predominio de especies hidrogenoides (p. ejm.  $H_2O$ ) en el vacío residual. En consecuencia, la mejora de la presión base y la disminución temporal de  $H_2O$  en el vacío residual como efecto del acondicionamiento con descarga de He, hacen que este procedimiento resulte fundamental a la hora de obtener descargas controladas y reproducibles en TJ-II.

Durante esta primera campaña se vio que esta técnica de acondicionamiento tenía importantes efectos sobre la densidad del plasma. El He que se ha implantado en la pared durante la descarga de acondicionamiento es liberado por el plasma caliente y

tiene una fuerte incidencia sobre el incremento de la densidad a lo largo de la descarga. Mediante el cuadrupolo con bombeo diferencial fue posible evaluar la cantidad de He liberado en cada descarga a lo largo de un día de operación. Los resultados, en unidades arbitrarias sin calibrar, se muestran en la Figura 6.



*Figura 6. Helio liberado en cada descarga de plasma a lo largo de un día de operación de TJ-II.*

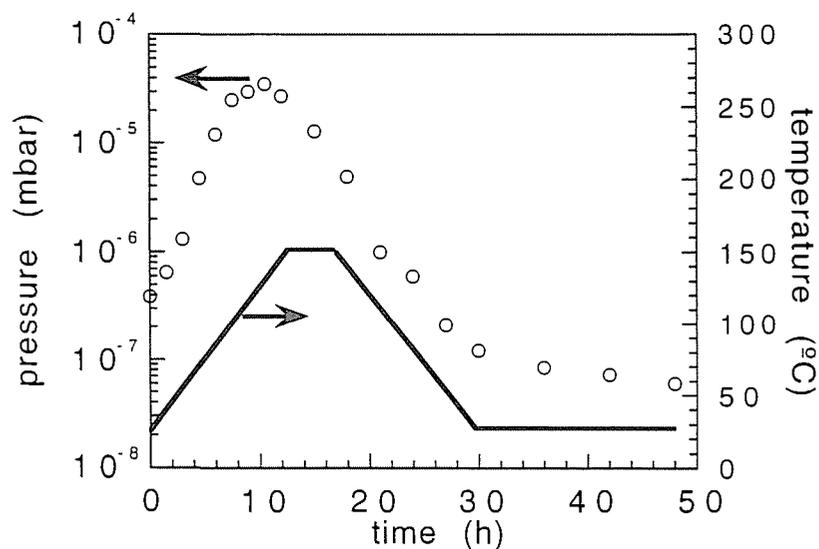
Los valores más altos de la figura 6 corresponden a las primeras descargas del día, realizadas inmediatamente después del acondicionamiento en He, en las cuales también se observa un fuerte incremento de la densidad. La cantidad de He liberado disminuye a lo largo de la secuencia de descargas y los valores mínimos de la figura 6 corresponden a descargas frías o de menor duración. Este problema de la contribución de He a la densidad de la descarga lo trataremos más adelante.

### **CALENTAMIENTO DE LA CAMARA DE VACIO (SEGUNDA CAMPAÑA EXPERIMENTAL, 1999)**

Al comienzo de la segunda campaña experimental (febrero de 1999) se procedió al primer calentamiento (baking) de la cámara de TJ-II. El calentamiento se efectúa mediante una combinación de inducción de corriente en la cámara y calentadores eléctricos. El

calentamiento por inducción se hace alimentando a las bobinas de campo toroidal con una corriente AC a 50 Hz y 280 A, la cual induce corrientes poloidales en la cámara de vacío. En las ventanas y apéndices, donde la inducción es menos eficiente, se emplearon resistencias eléctricas adicionales. Con el fin de alcanzar la máxima uniformidad una red neuronal (17) se encarga de controlar los más de 300 bucles con que consta el sistema.

En la figura 7 se representa la evolución de la temperatura y la presión base a lo largo de las 30 h del primer ciclo de calentamiento de la cámara de vacío.



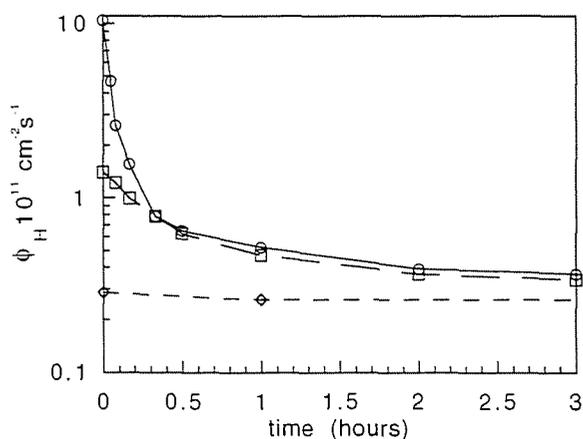
**Figura 7.** Evolución de la temperatura y la presión residual de TJ-II durante el ciclo de calentamiento de la cámara de vacío.

El ciclo térmico produce la eliminación de una parte del agua residual, como se confirma con los datos de espectrometría de masas, llevando a la presión base de TJ-II a valores próximos a  $5 \times 10^{-8}$  mbar. Estas buenas condiciones de vacío se mantuvieron incluso después de presurizar la cámara (con nitrógeno seco) para el mantenimiento de algunos diagnósticos. La presión base, que antes del ciclo estaba limitada por la presión parcial de  $H_2O$ , pasó a estar limitada por una fuga de aire exterior quizá debida a las tensiones mecánicas producidas durante el proceso térmico. Este hecho desaconsejó realizar algún otro ciclo térmico durante esta campaña. Además, la cantidad de  $H_2O$  residual pudo ser

eficientemente controlada mediante el acondicionamiento con descarga tipo glow en He como ya hemos mencionado.

### ACONDICIONAMIENTO POR DESCARGAS DE He

A lo largo de esta campaña el acondicionamiento de TJ-II consistió nuevamente en descargas tipo glow en He durante la noche (aprox. 14. h) antes de cada día de operación (11,12). Desde el principio de la campaña no se observó ninguna evolución aparente de las señales correspondientes a CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O asociada al proceso de acondicionamiento. En estas condiciones los efectos principales de la descarga en He son la eliminación del hidrógeno retenido en la pared durante las descargas de plasma del día anterior y la producción de una superficie activada con una alta capacidad de bombeo de H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub>.

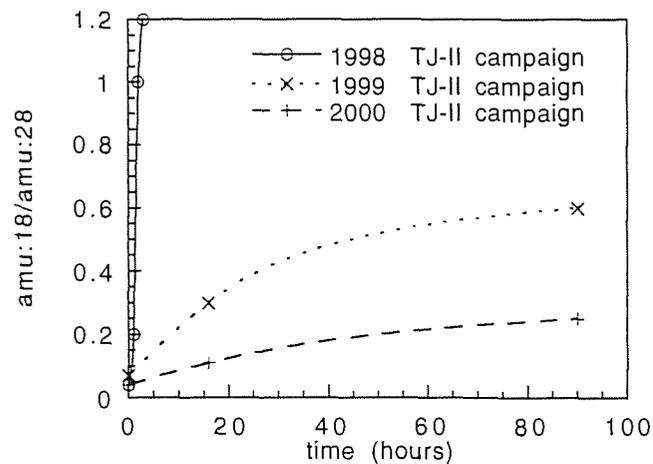


**Figura 8.** Flujo de H liberado durante el comienzo de una descarga de acondicionamiento en He. (o) Después de plasmas calientes en H<sub>2</sub>. ( ) Después de plasmas calientes en He. (x) 4 días después de plasmas en He.

El primer efecto se ilustra en la figura 8 donde se representa el flujo de átomos de hidrógeno liberados de la pared durante la descarga de He para tres condiciones iniciales diferentes. El máximo flujo de H corresponde a la descarga aplicada después de una serie de plasmas calientes en hidrógeno. Integrando la curva para todo el periodo de duración de la descarga se puede estimar una cantidad aproximada de  $10^{15}$  átomos H/cm<sup>2</sup>. La descarga después de una serie de plasmas calientes en He no libera ninguna

cantidad significativa de H. El caso intermedio corresponde a una descarga de He 4 días después de una serie de plasmas calientes en He. En este caso la difusión de átomos de H desde el bulk durante varios días produce un incremento en la cantidad de H desorbido.

El otro efecto es la activación de la superficie de la cámara de vacío con una fuerte capacidad de bombeo. Como mencionamos anteriormente este bombeo lleva a una disminución del  $H_2O$  y  $O_2$  en el vacío residual mientras la presión base se reduce aproximadamente en un 20%. La duración de este efecto de pared activada aumentó respecto a la primera campaña manteniéndose los bajos niveles de  $H_2O$  durante varios días. Esto se observa en la Figura 9, donde se compara la evolución de la relación entre el  $H_2O$  residual y la fuga residual (representada por el  $N_2$ , amu: 28) después de una noche de acondicionamiento con descarga de He durante las tres campañas experimentales de TJ-II. Claramente se observa cómo la duración de la activación de la pared se incrementa a medida que progresan las campañas.



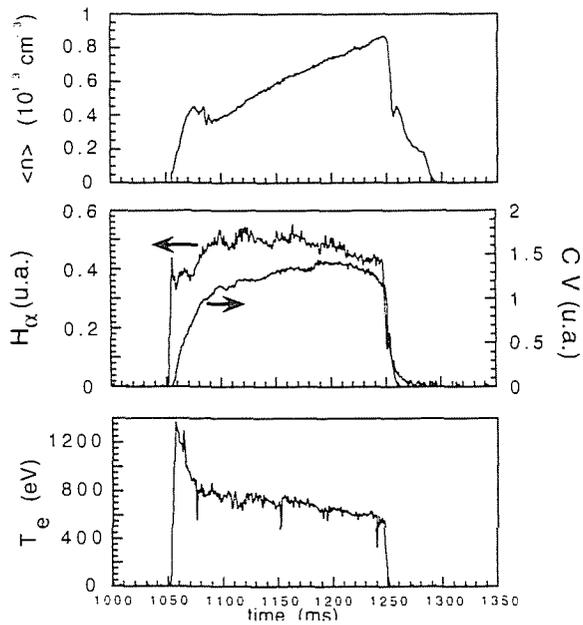
**Figura 9.** Evolución de la relación  $H_2O$ /fuga residual después del acondicionamiento para las 3 campañas experimentales.

La mejora de la presión base alcanzada al disminuir el  $H_2O$  residual (ciclo térmico de la cámara y acondicionamiento con He) ha tenido un importante efecto sobre la reproducibilidad de las descargas de TJ-II. Esto es debido a la supresión de las posibles fuentes de electrones libres que son acelerados por los campos eléctricos en las bobinas antes de la descarga. Como ya mencionamos estos electrones acelerados producen descargas de

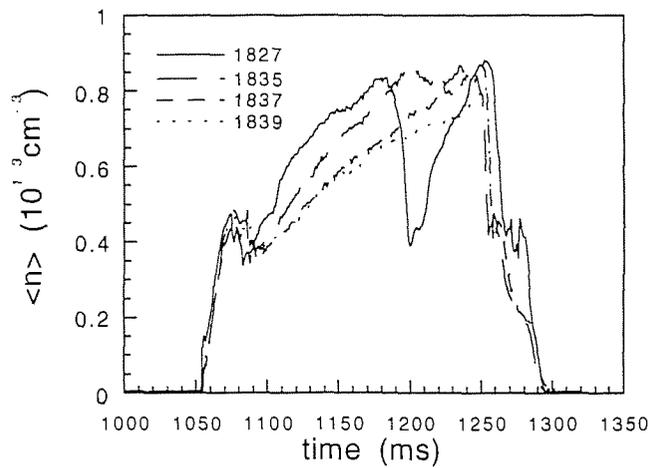
plasma no controladas y fuerte emisión de rayos-X. En las distintas campañas de TJ-II se encontró una correlación entre esta emisión de rayos-X y la presión residual en la cámara. Además la presencia de altos valores de especies hidrogenoides en el vacío residual ( $H_2O$ ) aumentó la producción de descargas con rayos-X. Como consecuencia de todo ello se ha seguido aplicando el acondicionamiento intensivo con descargas de He como método estándar en TJ-II, a pesar de los problemas de control de densidad que describiremos a continuación. Los intentos de acondicionamiento con descargas de  $H_2$ , que es el método más típico en dispositivos con pared sólo metálica (7,8), dió lugar a series de descargas muy irreproducibles con fuertes emisión de rayos-X. Además las descargas en  $H_2$  son bastante inestables a las presiones de acondicionamiento de TJ-II. Por otro lado, hasta el momento no hemos hecho ningún intento de descargas en  $H_2$  con la pared caliente, que es un método muy eficiente para eliminar el  $H_2O$  residual.

## **CONTROL DE DENSIDAD DESPUES DE He GDC**

El principal problema que surge después de acondicionar la cámara de TJ-II con He GD es la falta de control de la densidad del plasma, debido a la aportación del He implantado en la pared y liberado por el plasma caliente. En la figura 10 se muestra la evolución de alguno de los parámetros más significativos del plasma durante un pulso ECRH de 300 kW. En este caso las partículas del plasma provienen sólo de un pulso previo a la descarga, gas base, aproximadamente 50 ms antes que pulso ECRH. Como puede verse, la densidad aumenta continuamente durante la descarga mientras que los otros parámetros permanecen casi constantes. La descarga pertenece a una serie, a potencia constante, comenzando después del acondicionamiento con He GD. Las primeras descargas de la serie presentaron aumentos más pronunciados de la densidad, alcanzando el valor de corte de ECRH y en consecuencia enfriándose el plasma al dejar de absorber microondas. A medida que la serie avanza las pendientes son menos pronunciadas, como puede verse en la figura 11. Una densidad constante, como esperaríamos en el caso de descargas sólo con gas base, únicamente se alcanza al final del día (después de aproximadamente 20 descargas).

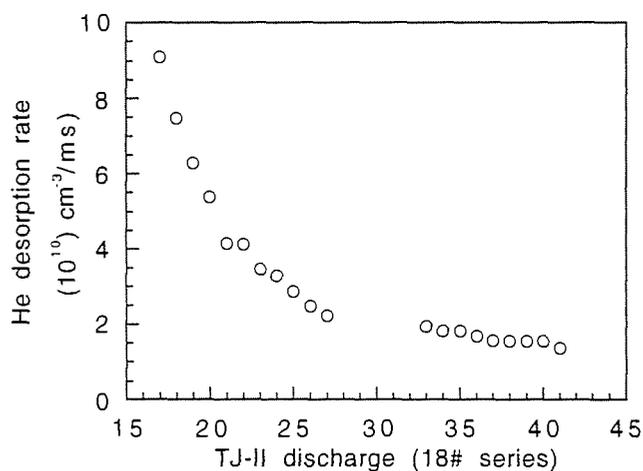


**Figura 10.**  
Evolución de los parámetros del plasma durante una descarga de TJ-II a 300 kW.



**Figura 11.** Evolución de la densidad del plasma durante una serie de descargas después del acondicionamiento con He GDC.

El continuo incremento de la densidad electrónica durante la descarga con una emisión de  $H\alpha$  constante implica la presencia de impurezas contribuyendo al plasma. Como la evolución de las señales de carbono y de oxígeno no muestran la misma tendencia, deben ser otras las especies que contribuyan al comportamiento de la densidad. En este sentido se estudió la cantidad de He desorbido en cada descarga mediante espectrometría de masa al final del pulso. La tasa de desorción de He producido en las descargas de la serie anterior, estimada con los calibrados absolutos del cuadrupolo, se muestra en la figura 12.

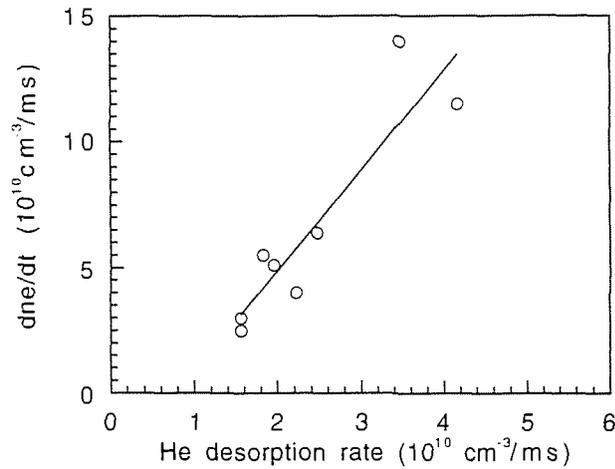


*Figura 12. Evolución de la desorción de He durante una secuencias de descargas a lo largo de un día de experimentos en TJ-II.*

Las tasas de desorción máximas (del orden de  $10^{19}$  partículas en un plasma de 200 ms) corresponden a las primeras descargas de la secuencia que alcanzan el valor de densidad de corte. Estos valores están en buen acuerdo con el balance de partículas para la configuración standard de TJ-II (volumen de plasma aprox.  $1\text{m}^3$ ).

La figura 13 muestra la relación entre la pendiente del incremento de densidad y la tasa de desorción. La proporcionalidad indica que al menos la mitad del incremento de densidad está causado por la desorción de He. Este valor debe ser considerado como un límite inferior ya que los datos del

cuadripolo pueden estar subestimados por la influencia de los campos magnéticos en el aparato.



*Figura 13. Relación entre la tasa de desorción de He y la pendiente del incremento de densidad en la secuencia de descargas de la figura 12*

### DESORCION DE He CON DESCARGA DE ARGON

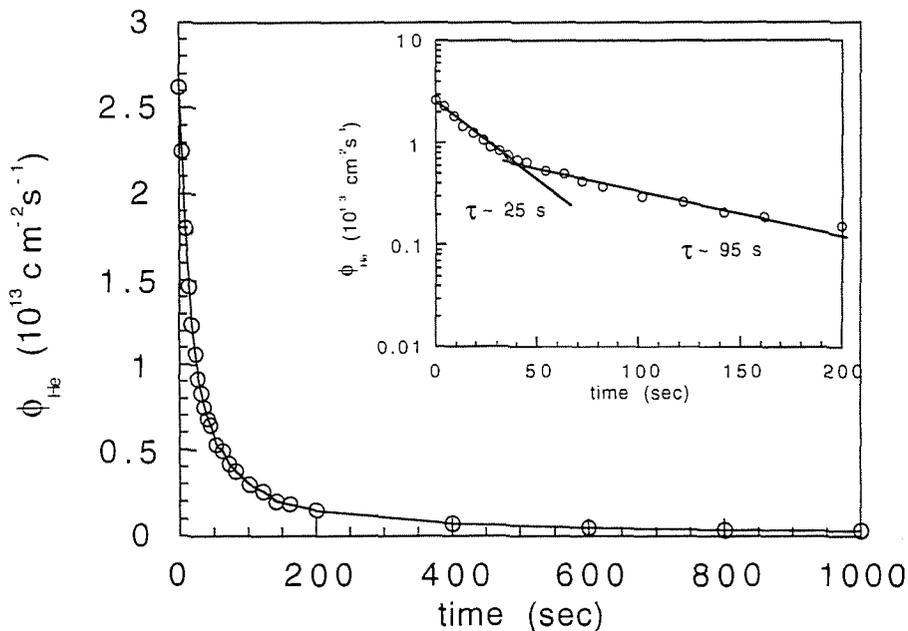
Como el acondicionamiento en He resulta necesario para conseguir descargas reproducibles en TJ-II, se requiere desarrollar algún sistema de desorber parte del He implantado en la pared antes de empezar las descargas ECRH. Con este propósito, a finales de 1999, se empezó a aplicar una descarga tipo glow en Ar durante 30 min después de la descarga en He nocturna y antes de la operación diaria con plasmas ECRH. De este modo el bombardeo de iones  $\text{Ar}^+$  que sufre la pared durante el GD desorbe el He implantado y a su vez la baja implantación de Ar evitaría problemas de control de densidad.

La figura 14 muestra la tasa de desorción de He durante una descarga de Ar ( $p=5 \times 10^{-3}$  mbar,  $I=1$  A por ánodo). La integración de la curva durante los 30 min de descarga muestra que una cantidad total de  $10^{21}$  átomos de He han sido desorbidos de la pared de TJ-II. Esta cantidad equivale a aprox. 1 monocapa de la cámara de vacío (considerando el área total  $75 \text{ m}^2$ ).

A partir de la Figura 14 se puede hacer una estimación de la sección eficaz de desorción de He por bombardeo con  $\text{Ar}^+$  ( $\sigma$ ). La evolución de la concentración de He en la superficie ( $n_s$ ) durante el comienzo del experimento de desorción (inserto en Figura 14) se puede aproximar a una cinética de primer orden (18):

$$dn_s/dt = -\sigma \phi_{in} n_s \quad [1]$$

donde  $\phi_{in}$  es el flujo incidente de iones Ar. En nuestro caso  $\phi_{in} = 2.5 \times 10^{13}$  iones/cm<sup>2</sup>s.



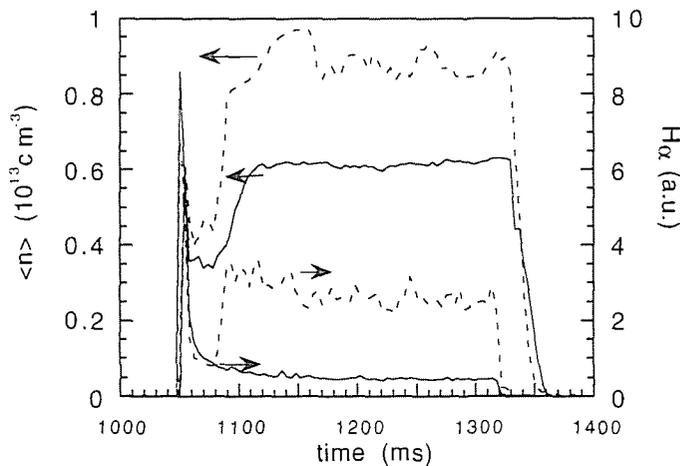
*Figura 14. Densidad de flujo de He desorbido durante una descarga glow de Ar inmediatamente después del acondicionamiento con descarga de He. El inserto muestra la caída inicial de la señal en escala semilogarítmica.*

Del comportamiento representado en la figura 14 se observa un claro cambio en la sección de desorción para tiempos superiores a 50 s. Los valores deducidos de las pendientes son  $1.6 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup> y  $0.4 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup> respectivamente. Este comportamiento concuerda con la fuerte disminución observada de la energía de atrapamiento del He en metales por encima de fluencias críticas (p.ejm.  $2 \times 10^{17}$

cm<sup>-2</sup> para Ni (19)). Las secciones eficaces estimadas en nuestros experimentos para la desorción de hidrógeno por bombardeo con Ar dan un valor constante de  $2.2 \times 10^{-16}$  cm<sup>2</sup>. Como referencia. Valores de  $3 \times 10^{-16}$  cm<sup>2</sup> se han reportado en sistemas H/W bombardeados con iones He de 500 eV (19). Sin embargo, la disociación del H<sub>2</sub> desorbido bien por el plasma o directamente en la pared activada, complicaría comparaciones entre nuestros datos y los obtenidos en experimentos de haces.

### CONTROL DE PLASMAS TJ-II DESPUES DE LA DESCARGA EN Ar

La desorción de aproximadamente 1 monocapa de He de la pared de TJ-II mediante la descarga de Ar produjo una gran mejora en el control de la densidad de los plasmas ECRH. La figura 15 muestra el comportamiento de la densidad electrónica central y la señal de H $\alpha$  en descargas con distinto suministro de gas y una potencia de ECRH de 500 kW.



**Figura 15.** Evolución de la densidad electrónica y la señal de H $\alpha$  en descargas TJ-II después del acondicionamiento en Ar. (—) sólo con prellenado de H<sub>2</sub>. (---) con suministro de H<sub>2</sub> durante la descarga.

Comparando estos resultados con los de la Figura 10 es evidente la mejora en el control de la densidad a pesar de que la potencia fue bastante superior (500 kW frente a 300kW). La figura 15 muestra cómo finalmente, gracias al tratamiento con Ar, la densidad pudo ser controlada mediante una inyección de H<sub>2</sub>

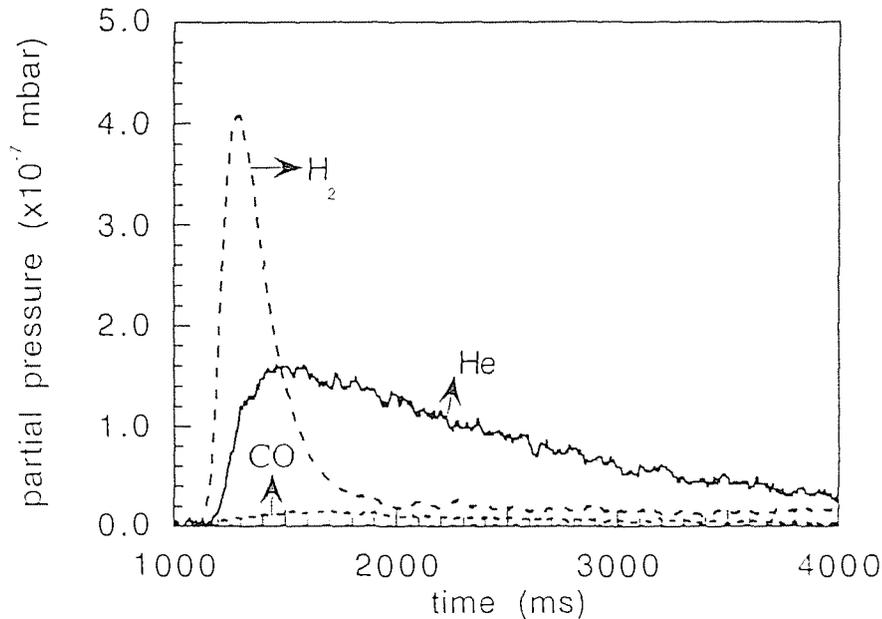
programada de tal forma que la densidad central se mantuviera por debajo del valor de corte durante toda la descarga. Este control de densidad mediante inyección de gas externo durante la descarga (puffing) fue posible tanto en descargas de H<sub>2</sub> como de He (20). La disminución de la contribución de He desorbido de la pared en las descargas después del tratamiento en Ar fue confirmado por medidas de espectrometría de masas de He al final del pulso. Los valores obtenidos fueron un factor 50 menores que los obtenidos después del tratamiento sólo con He y no se observó ninguna evolución temporal similar a la de la figura 12.

La densidad constante durante la descarga alimentada sólo con un pulso de prellenado de H<sub>2</sub> anterior al pulso ECRH debe producirse por la contribución de especies desorbidas por el plasma, ya que el reciclado de H después del GD en He es menor que 1. En este sentido es importante asegurar que la contribución de Ar al plasma sea mínima, ya que su elevado número atómico produciría un fuerte incremento en la Zeff del plasma. La baja probabilidad de implantación de los iones Ar<sup>+</sup> en el metal, comparada con los He<sup>+</sup> se evidencia en el análisis del vacío residual entre descargas, donde la contribución de la masa del Ar al espectro es aproximadamente un factor 50 menor que las correspondientes a las masas de H<sub>2</sub> y He. También la desorción de Ar por las descargas de plasma, medida con el RGA después de la descarga, muestra valores de tasas de desorción del orden de 10<sup>9</sup> cm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>, que son un orden de magnitud menor que las correspondientes a He mostradas en la figura 12.

## **EXPERIMENTOS DE DESORCION TERMICA EN TJ-II**

Con el fin de intentar cuantificar la contribución de las distintas especies desorbidas a la evolución de la densidad, se desarrollaron una serie de experimentos de desorción térmica en TJ-II después del acondicionamiento con descargas GD de He y Ar. Para ello se hicieron descargas del gyrotron (microondas de alta potencia) directamente sobre la superficie de la cámara acondicionada antes de las descargas de plasma. El calentamiento de la zona donde impacta el haz de microondas produce la desorción de especies adsorbidas en la superficie que son analizadas por medio del RGA.

La figura 16 muestra las especies desorbidas con un pulso del gyrotron de 400 kW durante 100 ms, efectuado aproximadamente 1 hora después de finalizar la descarga de acondicionamiento con Ar. Las especies mayoritarias fueron H<sub>2</sub> y He seguidas por una pequeña cantidad de CO. La contribución de Ar estaba por debajo del límite experimental.



*Figura 16. Evolución de H<sub>2</sub>, He y CO desorbidos disparando el gyrotron (400 kW, 100 ms) directamente sobre la pared acondicionada. La señal de Ar estaba por debajo del límite de detección.*

En consecuencia, suponiendo que la interacción del plasma produzca una relación similar de las especies desorbidas, podemos concluir que la contribución del argón a la densidad del plasma debe ser mínima. Estos resultados concuerdan con los bajos niveles de  $Z_{\text{eff}}$  estimados para plasmas de H<sub>2</sub> a partir de medidas de rayos-X (20).

En la figura 14 se ve una clara diferencia en la evolución temporal del H<sub>2</sub> y del He. La rápida caída de la señal de H<sub>2</sub> indica que tiene lugar un bombeo más elevado para esta masa, indicativo de la fuerte contribución que tiene sobre el bombeo de H<sub>2</sub> la pared activada después del GDC. La fuente de H<sub>2</sub> en este experimento no está clara ya que la pared activada tras el acondicionamiento debe estar vacía de H<sub>2</sub>. Probablemente las especies hidrogénicas asociadas al agua residual en la pared activada puedan explicar la

cantidad de  $H_2$  desorbido. La medida del  $H_2O$  desorbida térmicamente no fue posible debido a la baja conductancia del sistema y el fuerte bombeo de la pared activada.

## CONCLUSIONES

Durante las primeras campañas ECRH del stellarator TJ-II (1998-2001) se ha mantenido el carácter metálico de la pared y su acondicionamiento se ha basado en técnicas de "glow discharge". El empleo intensivo de He GD durante toda la noche antes de un día de experimentos se hizo necesario con el fin de obtener descargas reproducibles y con bajos niveles de electrones rápidos en el arranque. De este modo se garantiza un inicio de experimentos en las condiciones de pared reproducibles independientemente de las descargas del día anterior. Sin embargo con este procedimiento se alcanzan altas concentraciones de He implantado en la pared que es desorbido por las descargas de plasma produciendo incrementos no controlados de densidad. Así se llegaron a medir tasas de desorción de He del orden de  $4 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}$  en descargas de  $H_2$ . La aplicación de una descarga de Ar durante 30 min antes de comenzar los experimentos permitió la desorción de aproximadamente  $10^{21}$  átomos de He obteniéndose descargas ECRH con buen control de densidad y valores bajos de  $Z_{\text{eff}}$ .

En las futuras campañas con calentamiento adicional (NBI) los flujos a la pared, térmicos y de partículas, serán superiores, esperándose un aumento del sputtering metálico. En consecuencia las técnicas de acondicionamiento deberán adaptarse al nuevo escenario. El recubrimiento de la pared con una capa de B/C mediante deposición asistida con plasma (boronización) y la sustitución de los limitadores metálicos por otros de grafito son las propuestas para reducir el sputtering en estas condiciones.

## REFERENCIAS

- (1) G.M. McCracken, P.E. Stott. *Nuclear Fusion*, **19**, 889 (1979).
- (2) H.F. Dylla. *J. Nucl. Mater.* **93&94**, 61 (1980).
- (3) D.E. Post, R. Behrish, eds. *Physics of Plasma Wall Interaction in Controlled Fusion Devices*. Plenum, New York, 1986.
- (4) P.C. Stangeby, G.M. McCracken. *Nuclear Fusion*, **30**, 1225 (1990).
- (5) W.O. Hofer, J. Roth eds. *Physical Processes of the Interaction of Fusion Plasmas with Solids*. Academic Press. San Diego, 1996.
- (6) J. Winter. *Plasma Phys. Control. Fusion* **38**, 1503 (1996).
- (7) H.F. Dylla. *J. Va. Sci. Technol.* **A6**, 1276 (1988).
- (8) F. Waelbroeck, J. Winter, P. Wienhold. *J. Vac. Sci. Technol.* **A2**, 1521 (1984).
- (9) J.A. Tagle, E. Melches. Junta de Energía Nuclear. Informe interno. FTN 83/1 (1983).
- (10) F.L. Tabarés, D. Tafalla, E. De la Cal and B. Brañas. *J. Nucl. Mater.* **266-269**, 1273 (1999).
- (11) D. Tafalla and F.L. Tabarés. *Vacuum* (2001) en prensa.
- (12) D. Tafalla and F.L. Tabarés. *J. Nucl. Mater.* **290-293**, 1195 (2001).
- (13) C. Alejaldre et al. *Plasma Phys. Control. Fus.* **41**, A-539 (1999).
- (14) J. Sánchez et al. *J. Plasma Fus. Res. (series)* **1**, 338 (1998).
- (15) J. Botija et al. *Proc. 17<sup>th</sup> Symp. on Fusion Technology*. Rome. p-201 (1992).
- (16) F. L. Tabarés, A. García and J. Botija. *Vacuum* **45**, 1059 (1994).
- (17) I. Labrador, R. Carrasco, L. Martínez. Informe Técnico Ciemat **786** (1996).
- (18) J. Pillath and J. Winter. *J. Nucl. Mater.* **176&177**, 319 (1990).
- (19) E. Taglauer in "Data compendium for Plasma-Surface Interactions" capítulo 4. *Nucl. Fusion special issue*. IAEA, Viena (1984) y referencias del mismo.
- (20) F.L. Tabarés et al. *J. Nucl. Mater.* **290-293**, 748 (2001).