

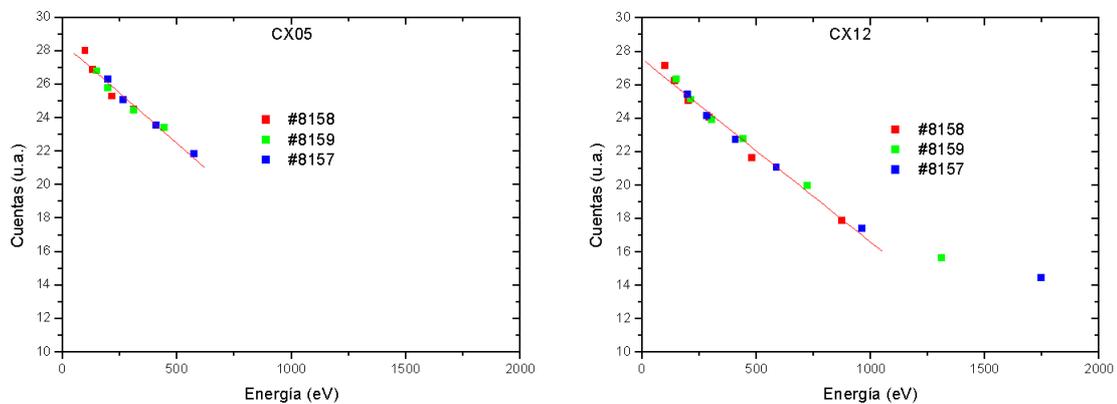
## Capítulo 6

# Medidas con el espectrómetro de intercambio de carga

## 6.- Medidas con el espectrómetro de intercambio de carga

### 6.1.- Espectros de energía

El espectrómetro de intercambio de carga mide el espectro de energía de los neutros que escapan del plasma. A partir de este espectro se pueden deducir diferentes parámetros de interés para caracterizar el plasma. La principal magnitud que se deduce es la temperatura de los iones del plasma.



**Fig. 6.1.** Espectros obtenidos con el analizador de 5 canales (izquierda) y el Acord12 (derecha) para las descargas #8157, #8158 y #8159.

En la figura 6.1 se muestra el espectro de energía obtenido con los dos analizadores de TJ-II para una misma serie de descargas. También está indicada la recta de regresión lineal de la que se obtiene la temperatura de los iones. Se trata de unas descargas en la configuración 100\_36\_62 y con una densidad de línea de los electrones de aproximadamente  $0.7 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , la temperatura de los electrones es de unos 950 eV en el centro y el calentamiento del plasma es por 300 kW de ondas ciclotrón electrón. En este caso los espectrómetros contaban los neutros provenientes de un radio efectivo igual a +0.1 para el Acord12 y de -0.1 para el analizador de 5 canales.

En este caso se han utilizado los datos de tres descargas porque éstas son de iguales características, con lo que entre descargas se ha variado la energía a la que se contaban los neutros para obtener un espectro de energías más amplio. En el caso del analizador de 5 canales el espectro de energía analizado se encuentra entre 100 eV y 576 eV, obteniendo una temperatura iónica de 89 eV. No se ha tenido en cuenta el número de neutros contados de 100 eV porque son

neutros que proceden del borde del plasma y se está midiendo la temperatura en el centro. Para el Acord12 la energía medida se encuentra entre 100 eV y 1748 eV, aunque para los cálculos no se ha tenido en cuenta los valores superiores a 1000 eV, pues en este caso el número de partículas detectadas se encontraba por debajo del nivel de ruido de los detectores. Despreciando también las cuentas de 100 eV por tratarse de neutros del borde del plasma, la temperatura iónica resultante es de 91 eV.

En este ejemplo puede verse claramente cómo el Acord12, para un mismo número de descargas, da un mayor número de canales y más amplio espectro de energías analizadas, con lo que sus resultados normalmente serán más precisos que los del analizador de 5 canales. A pesar de estas diferencias la temperatura es muy similar pues estaban analizando posiciones simétricas del plasma.

## **6.2.- Flujos de neutros de intercambio de carga y asimetrías poloidales en el heliac flexible TJ-II**

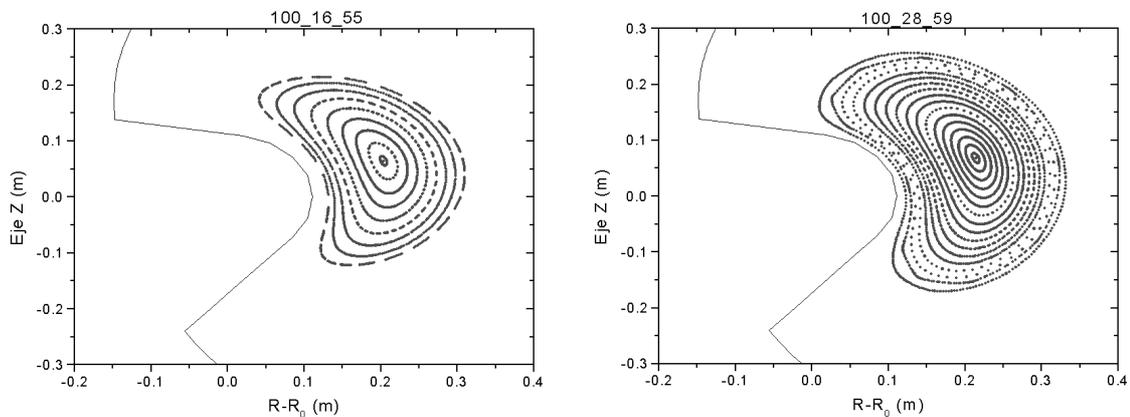
### *6.2.1.- Datos experimentales*

Para el cálculo de los flujos de neutros de intercambio de carga y las asimetrías poloidales en el stellarator TJ-II se han utilizado los espectrómetros descritos en el capítulo 3 de la presente tesis.

Las medidas se realizaron en la campaña experimental de marzo-julio de 2002. Para ello se utilizaron plasmas de hidrógeno calentados mediante 300 kW de ondas ciclotrón-electrón. En las descargas el gas es introducido en el mismo sector que los analizadores de partículas neutras para aumentar el flujo de neutros delante del colimador de los espectrómetros y así obtener una mayor señal para el análisis.

La densidad electrónica de línea varía entre  $0.5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  y  $1.2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  y las temperaturas electrónicas centrales varían entre 500 y 800 eV en todas las descargas. Se realizaron series reproducibles de descargas en dos configuraciones magnéticas diferentes.

Se han analizado dos configuraciones magnéticas diferentes, la 100\_28\_59 y la 100\_16\_55, ambas son configuraciones con radio menor medio pequeño, con lo que los analizadores pueden barrer la mayor sección poloidal del plasma. El radio menor medio de la configuración 100\_28\_59 es de 18.3 cm, mientras que el de la configuración 100\_16\_55 es de 14.7 cm. En la primera de las configuraciones es de  $0.882 \text{ m}^3$  y en la segunda  $0.566 \text{ m}^3$ . El valor de la transformada rotacional ( $\iota/2\pi$ ) en el centro es de 1.21 para la configuración 100\_28\_59 y de 1.38 para la 100\_16\_55. Ninguno de los dos casos presenta racionales dentro del plasma de manera que no se inducen islas magnéticas en la configuración. En la figura 6.2 se muestra un dibujo de las dos configuraciones magnéticas analizadas.



**Fig. 6.2.** Dibujo de las dos configuraciones magnéticas utilizadas para medir los perfiles de flujo de neutros. Se muestra también el perfil de la cámara de vacío, la muesca a la izquierda es la posición que ocupa el *hard-core*. Los espectrómetros se encuentran a la derecha de la cámara. El dibujo se ha realizado en el ángulo toroidal donde está situado el diagnóstico.

Configuración	Radio menor (cm)	Iota central ( $\iota/2\pi$ )	Volumen ( $\text{m}^3$ )
100_28_59	18.3	1.21	0.882
100_16_55	14.7	1.38	0.566

**Tabla 6.1.** Principales valores de las configuraciones utilizadas para el experimento.

El rizado magnético en TJ-II llega a valores del 35% en el borde de la configuración lo que hace que la fracción de partículas atrapadas en las esquinas del dispositivo (ángulos toroidales  $\Phi=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ) alcance valores bastante altos: alrededor del 10% cerca del eje del plasma y entre 30% y 40% cerca del borde del plasma. Como los analizadores están cerca del ángulo toroidal  $\Phi=0^\circ$  los hace muy útiles para estas medidas.

En la configuración 100\_28\_59 se midieron los flujos con campo magnético estándar e invertido, en ambos casos con limitador. En el caso de la configuración 100\_16\_55 se midió sólo con los campos magnéticos invertidos con dos disposiciones diferentes, una vez con limitador y otra con separatriz.

Se realizaron dos o tres descargas por posición radial para obtener más energías a las que son analizados los neutros de intercambio de carga y así, al hacer la regresión lineal para obtener la temperatura iónica, tener más puntos mejorando de esta manera la precisión del resultado.

### 6.2.2.- Medida de flujos

Si se tiene un campo eléctrico en un plasma variará la distribución de la pérdida de iones en la cámara de vacío. En TJ-II, para iones de 0.5 keV el máximo de pérdidas se tiene en un valor del ángulo poloidal  $\Phi_{\text{v}}=55^\circ$  en ausencia de campos eléctricos [Gua 00]. Con el sistema de coordenadas usado para el estudio de las pérdidas este ángulo corresponde a que las pérdidas se producen mayoritariamente en la parte inferior de la cámara de vacío si los campos magnéticos están invertidos.

Si se crea un campo magnético en el plasma la distribución de pérdidas variará debido a la modificación de las derivas por la introducción del siguiente término en el cálculo de las derivas [Poz 84]:

$$v_E = \frac{\overline{E} \times \overline{B}}{B^2} \quad (6.1)$$

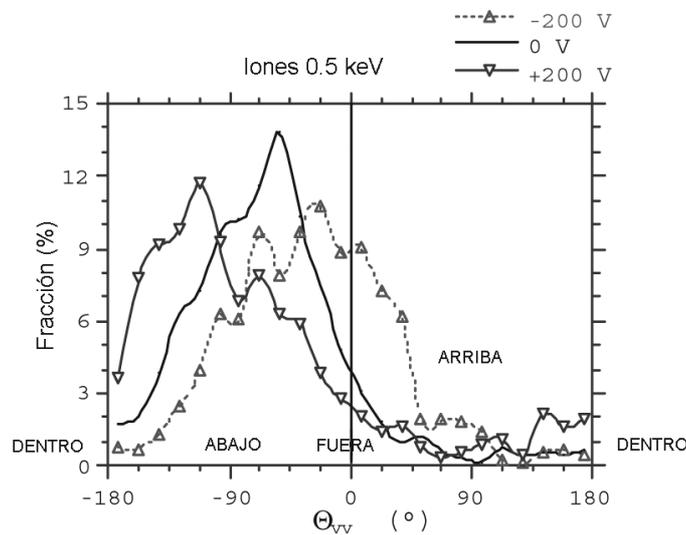
Este nuevo término ( $v_E$ ) induce una rotación poloidal independiente de la energía, velocidad y carga de la partícula, sólo depende del campo eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $B$ ). La rotación se produce en la superficie magnética y es perpendicular a la dirección del campo magnético local.

Para potenciales de plasmas positivos, como el campo eléctrico está dirigido hacia afuera del plasma y la componente toroidal del campo magnético de TJ-II es siempre negativa [Gua 00], la rotación es en el sentido de las agujas del reloj en el espacio real: en la dirección negativa

poloidal, la misma dirección de rotación que el plasma o las bobinas. Esto refuerza la velocidad de deriva en la mayor parte de los puntos de las superficies magnéticas, y cuando el potencial va aumentando restringe cada vez más las zonas donde el componente poloidal es positivo.

Para potenciales negativos sucede lo contrario, la rotación poloidal inducida es positiva en el espacio real y las regiones con componente negativa se restringen cada vez más [Gua 00b].

Se han visto derivas verticales de partículas que parece que están de acuerdo con los valores predichos que se muestran en la figura 6.3.



**Fig. 6.3.** Perfil poloidal de la distribución de pérdidas de iones de 500 eV para varios potenciales eléctricos. Está normalizado al 100% y los espectrómetros analizan de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ . [Gua 00]

### 6.2.3.- Asimetrías poloidales en TJ-II

Con los datos obtenidos en los experimentos y a partir de los flujos de neutros de intercambio de carga se ha calculado la temperatura de los iones en diferentes puntos del plasma, obteniendo de esta manera perfiles de la temperatura.

Como se ha dicho en el apartado 6.2.1. se tienen valores en dos configuraciones magnéticas diferentes y en cada una de ellas con dos disposiciones diferentes. Resulta un total de cuatro perfiles de temperatura iónica:

- 100\_28\_59 con campos magnéticos normales.
- 100\_28\_59 con campos magnéticos invertidos.
- 100\_16\_55 con campos magnéticos invertidos y limitador en  $\rho=0.9$  (baja densidad).
- 100\_16\_55 con campos magnéticos invertidos y sin limitador (alta densidad).

En la configuración 100\_28\_59 el limitador se encuentra en  $\rho=0.7$  en los dos casos estudiados. El objetivo de introducir el limitador hasta esta posición es poder tener valores de la temperatura iónica en la mayor parte del perfil poloidal del plasma, pues la disposición actual de los espectrómetros no permite barrer toda la superficie del plasma.

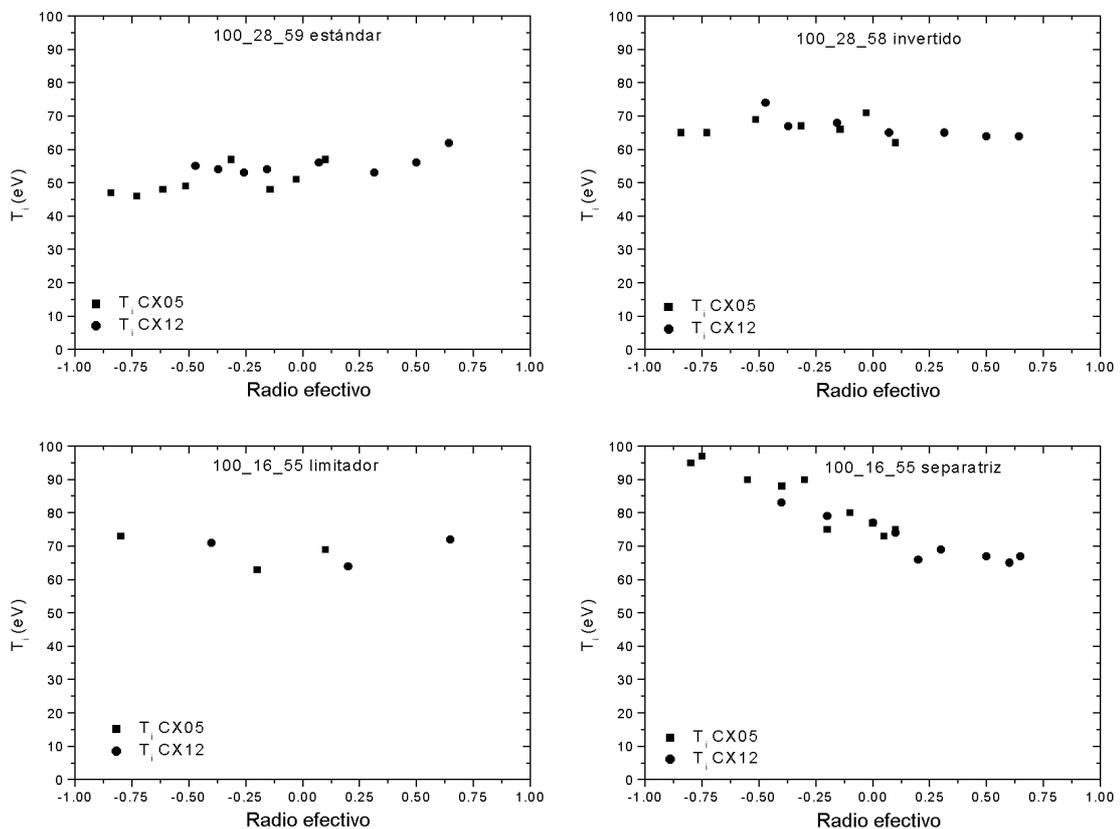


Fig. 6.4. Perfiles de temperatura de los iones en los casos estudiados para los dos espectrómetros.

Para el caso de la configuración 100\_28\_59 con campos magnéticos normales la densidad electrónica lineal es baja, con valores de alrededor de  $0.6 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , la temperatura electrónica está entre 600 eV y 800 eV y la temperatura de los iones resulta de 55 eV  $\pm$  5 eV con un perfil de la temperatura aproximadamente plano.

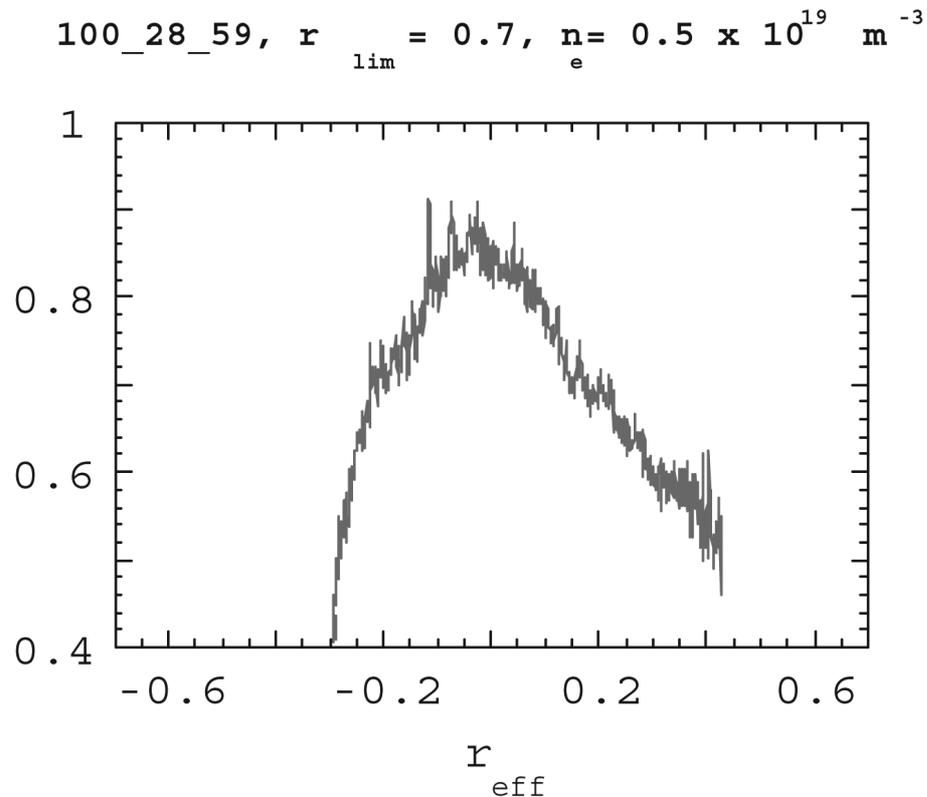
En las medidas de la configuración 100\_28\_59 con campos magnéticos invertidos la densidad lineal es de alrededor de  $0.8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , la temperatura electrónica es de 700 eV y la temperatura iónica es ligeramente superior al caso anterior, de unos 70 eV aproximadamente, siendo el perfil igualmente plano.

En la configuración 100\_16\_55 con limitador la densidad electrónica lineal es de  $0.8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  aproximadamente, siendo la temperatura electrónica de 700 eV con una temperatura iónica también de unos 70 eV y un perfil aproximadamente plano.

En el último caso, configuración 100\_16\_55 sin limitador, la densidad lineal de los electrones está entre  $1.0 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  y  $1.2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  con una temperatura electrónica de unos 700 eV. En este caso el perfil de la temperatura presenta una clara asimetría arriba-abajo, siendo mayor la temperatura para valores negativos del radio menor del plasma (se entiende por valores negativos los que están por debajo del eje magnético).

Para la configuración 100\_28\_59 se tiene el valor del potencial del plasma medido con el diagnóstico Heavy Ion Beam Probe (HIBP) [Bon 00]. En la figura 6.5 se muestra el perfil del potencial magnético del plasma para esta configuración magnética. Se puede ver que el valor central es de 900 V cayendo en los bordes.

Para la configuración 100\_16\_55 no se tienen valores del potencial medidos con el HIBP, para la medida aproximada del potencial se utiliza la medida de la rotación del plasma. En el caso de las medidas sin limitador se obtiene un valor en el centro del plasma de  $\omega_r = 4 \cdot 10^5 \text{ rads}^{-1}$ , mientras que en el caso del limitador este valor es de  $\omega_r = 18 \cdot 10^5 \text{ rads}^{-1}$ , ambos indicando un sentido positivo del campo. La densidad electrónica no es exactamente la misma pero una explicación a este aumento de la rotación del plasma puede ser debida a un aumento del campo eléctrico del plasma.



**Fig. 6.5.** Potencial del plasma en kV para la configuración magnética 100\_28\_59 con el limitador en radio efectivo 0.7 y densidad  $0.5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  [Fon 02]

#### 6.2.4.- *Discusión*

El diferente comportamiento del perfil de la temperatura iónica puede explicarse a partir de las derivas  $\mathbf{ExB}$ . Como se puede ver en la figura 6.3 donde se han calculado las derivas de los iones en caso de campos magnéticos invertidos para una configuración estándar de TJ-II, los iones más energéticos se escapan más en la parte inferior de la cámara de vacío para el caso de campo eléctrico nulo. Este desplazamiento hacia la parte inferior de la cámara se acentúa para el caso de campos eléctricos positivos, mientras que para los negativos es inverso.

El efecto del campo eléctrico depende principalmente de la relación  $V_0/E_i$ , donde  $V_0$  es el potencial central del plasma, suponiendo que tiene un perfil parabólico, y  $E_i$  es la energía de los iones. El desplazamiento se observa cuando esta relación toma un valor de 0.4. Si la relación

entre estas dos cantidades aumenta, la distribución de los iones se expande a lo largo de todo el radio del plasma.

En los casos estudiados en este capítulo el valor de potencial en el centro del plasma es de  $V_0=900$  V y la  $E_i=100$  eV para los casos de baja densidad con lo que la relación entre los dos parámetros es mayor de 1.

Los primeros resultados muestran que en la configuración 100\_16\_55 en alta densidad el perfil de potencial es plano. El perfil plano justificaría un campo eléctrico pequeño de lo que deriva una mayor asimetría en la temperatura iónica.

En todos los casos la dependencia de la densidad con el potencial del plasma muestra que para alta densidad se tiene un bajo potencial en configuraciones magnéticas grandes. En los casos de baja densidad el potencial del plasma disminuye con el radio resultando un campo eléctrico mayor, de unos 50 V/cm. Este campo eléctrico modifica las derivas de los iones, haciendo que estos se distribuyan a lo largo de todo el radio del plasma de modo que el perfil de la temperatura iónica resulta plano.

### **6.3.- Mejora del confinamiento mediante la inducción de corriente**

#### *6.3.1.- Introducción*

El heliac flexible TJ-II es una máquina con la que se pueden estudiar las propiedades de confinamiento gracias a su posibilidad de cubrir varias configuraciones magnéticas con características diferentes. Se han realizado unos experimentos introduciendo una corriente en el plasma mediante un transformador, similar al calentamiento óhmico de los tokamaks, en los que se ha encontrado que una corriente positiva degrada el confinamiento y viceversa [Rom 02]. Esta mejora del confinamiento con medios externos al plasma es interesante pues abre una vía para el control externo del confinamiento en stellarators.

En los primeros experimentos se consiguió mejorar el confinamiento pero no se dedujo la razón por la que se produce esta mejora, puede ser tanto por el campo eléctrico toroidal inducido como por la variación de la cizalla magnética. Para discriminar cuál de los dos efectos es el responsable de la mejora de confinamiento se han realizado nuevos experimentos en los que se produce corriente en el plasma por medios no inductivos [Lop 02b]. Para ello se varía el índice de refracción de la onda de calentamiento  $N_{\parallel}$  por medio de un espejo móvil en la línea de calentamiento por resonancia electrón ciclotrón de TJ-II. La variación del índice de refracción crea corrientes de ambos signos sin inducción de campo eléctrico. Para  $N_{\parallel} = 0$  no se produce corriente, para  $N_{\parallel} = +0.2$  se produce una corriente de -1 kA y para  $N_{\parallel} = -0.2$  la corriente producida es de 0.3 kA.

En este apartado de la tesis se ha intentado ver si esta mejora (o degradación) del confinamiento por medio la inducción de corriente en el plasma afecta a la temperatura de los iones.

### 6.3.2.- Datos experimentales

Para comprobar si la temperatura iónica varía al variar el confinamiento mediante corriente inducida se han utilizado disparos de la campaña de marzo-julio de 2002 del stellarator heliac flexible TJ-II. Se han escogido los disparos del día 11 de abril de 2002 en los que se variaba la posición del espejo y la inducción de corriente en las descargas de manera que se puede estudiar los dos efectos por separado. Se ha variado la posición del espejo para obtener los siguientes índices de refracción,  $N_{\parallel} = 0$ ,  $N_{\parallel} = +0.2$  y  $N_{\parallel} = -0.2$ . También se ha inducido corriente de tres maneras diferentes para obtener mayor o menor corriente del plasma. Estas tres maneras se han llamado rampa rápida, intermedia y lenta, pues la inducción se realiza por la variación de la corriente en las bobinas óhmicas, cuanto más rápida sea esta variación mayor será la corriente inducida en el plasma. La rampa rápida llega hasta aproximadamente -9 kA, la intermedia alcanza -6 kA, mientras que la lenta se queda en -4 kA. Todas las descargas se realizaron en la configuración 100\_44\_64 con 300 kW de potencia de calentamiento y utilizando como gas de trabajo hidrógeno.

<b>Rampa</b> \ $N_{\parallel}$	<b>0</b>	<b>+0.2</b>	<b>-0.2</b>
<b>Rápida</b>	#6907	#6910 #6913 #6914	#6920 #6921
<b>Intermedia</b>	#6924	#6926	#6923
<b>Lenta</b>	#6906 #6908	#6912 #6915 #6916	#6917 #6918 #6919
<b>Sin OH</b>	#6905	#6911	#6922

**Tabla 6.2.** Descargas utilizadas y corrientes y tipo de calentamiento de cada una para el experimento.

En la tabla 6.2 se muestran las descargas en cada configuración, en los casos en que hay más de una descarga con las mismas características, se varió la posición en la que se medía la temperatura.

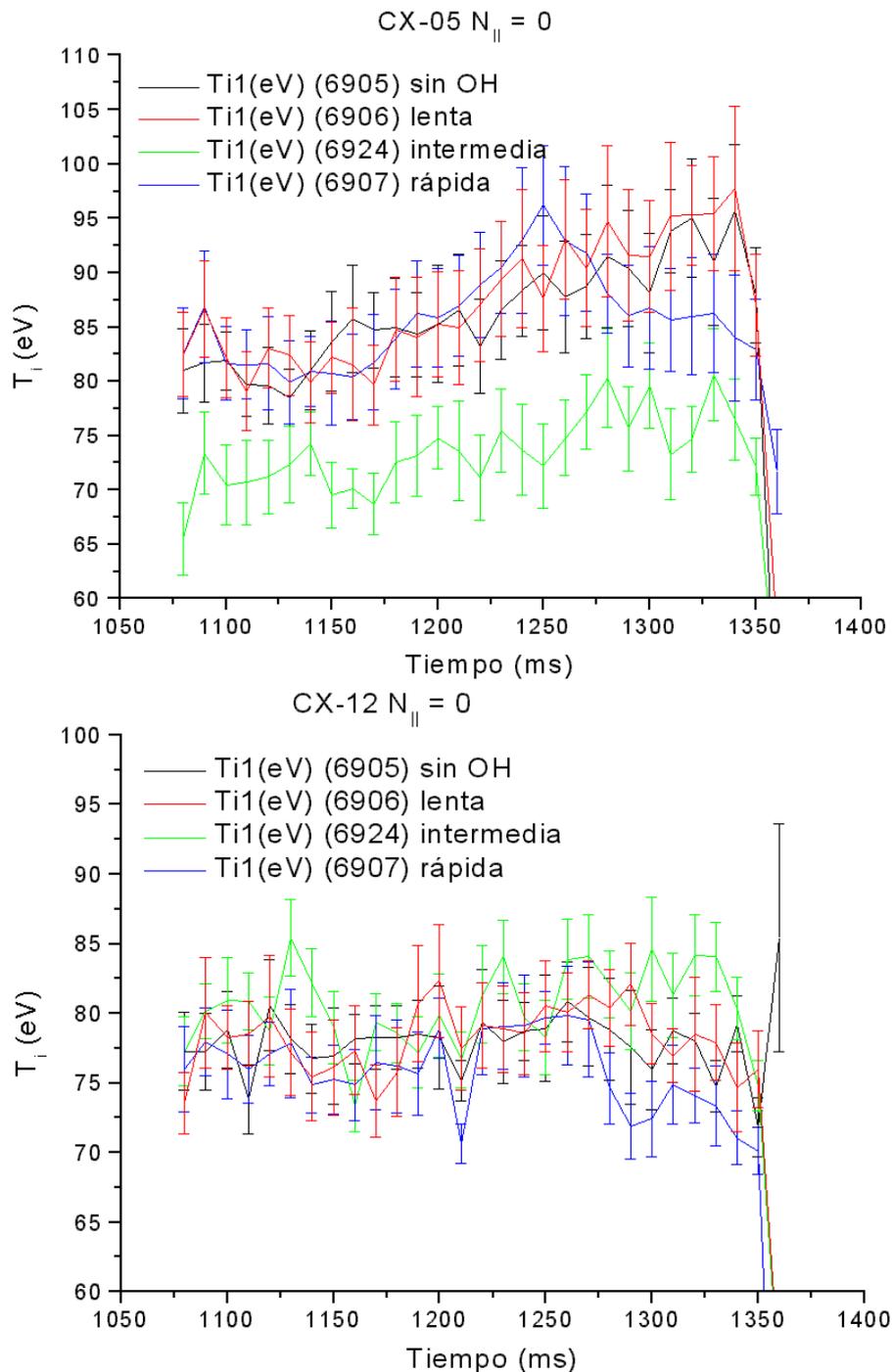
### 6.3.3.- Cálculo de la temperatura iónica

Se ha calculado la temperatura de los iones para todas las descargas citadas anteriormente. Con los cálculos realizados se han agrupado las descargas por sus características, las que tienen igual rampa de corriente y las que tienen igual índice de refracción. Con esto se ha pretendido ver la influencia de estos dos parámetros en la temperatura de los iones. Antes de realizar estos cálculos también se han comparado las descargas con iguales características pero diferente posición de los espectrómetros y se ha visto que la posición no influye decisivamente en la temperatura medida. Este resultado es igual al del apartado 6.2. en el que se veía que el perfil de la temperatura de los iones era plano para plasmas de baja densidad.

$$N_{\parallel} = 0$$

En este caso, por problemas de operación el punto al que miran los dos espectrómetros no es simétrico, excepto en el caso de rampa intermedia (#6924). En la rampa intermedia los analizadores miran al punto de radio efectivo  $\pm 0.1$  (positivo para el Acord12), mientras que en el resto de casos el espectrómetro de 5 canales analiza los neutros que se encuentran en un radio

efectivo de 0.05 y el Acord12 los de radio efectivo igual a 0.35. La energía mínima a la que se analizan los neutros es de 200 eV en todas las descargas, excepto en la de la rampa intermedia en la que se analizan a 150 eV. Las densidades y temperaturas de estas descargas son muy similares entre ellas.



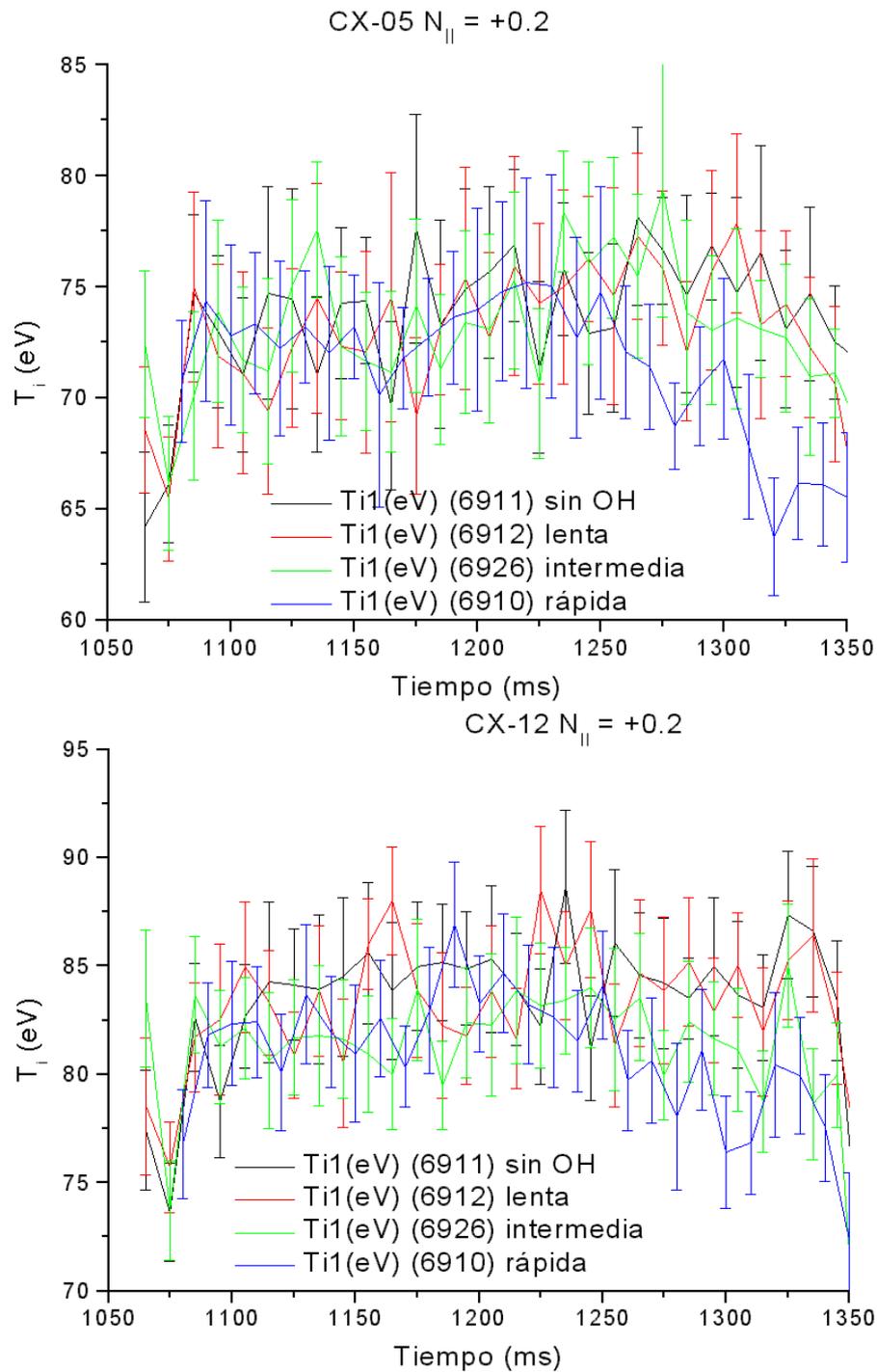
**Fig. 6.6.** Temperatura iónica para el caso en que el calentamiento es totalmente perpendicular (no se crea corriente no inductiva). Se muestran los resultados para los dos espectrómetros con 4 corrientes inducidas diferentes.

Se puede observar en la gráfica 6.6 cómo para el Acord12 todas las temperaturas son prácticamente iguales, mientras que para el analizador de 5 canales se observa cómo la temperatura con rampa intermedia es menor que los otros casos estudiados. Esto puede ser debido a que en esta descarga se miraron los neutros a menor energía, con lo que la temperatura calculada es menor. Otra característica que se puede observar es la disminución de la temperatura de los iones al final de la descarga con rampa rápida. Esto no es un efecto debido a disminución de densidad ya que en este caso, la densidad aumenta al final de la descarga. Comienza esta disminución de temperatura a partir de 1250 ms aproximadamente.

$$N_{\parallel} = +0.2$$

En este grupo de descargas todas ellas miran el mismo punto del plasma, en un radio efectivo  $\pm 0.1$  (positivo para el Acord12) y la energía mínima que cuentan es de 150 eV. En este caso la densidad de la descarga con la rampa intermedia es ligeramente superior a las otras tres. Al igual que sucedía en el grupo estudiado anteriormente la densidad de la descarga con rampa rápida sube hacia el final de la descarga, a partir de 1250 ms aproximadamente.

Puede observarse en este caso como también las temperaturas son muy iguales entre sí, no importando la corriente inducida. Sí que se puede observar un efecto cuando la rampa es rápida, a partir de 1250 ms aproximadamente la temperatura de los iones baja. Este efecto también se observa, pero en menor medida en la rampa intermedia en el Acord12, en el caso del espectrómetro de 5 canales solo lo presenta la rampa rápida.

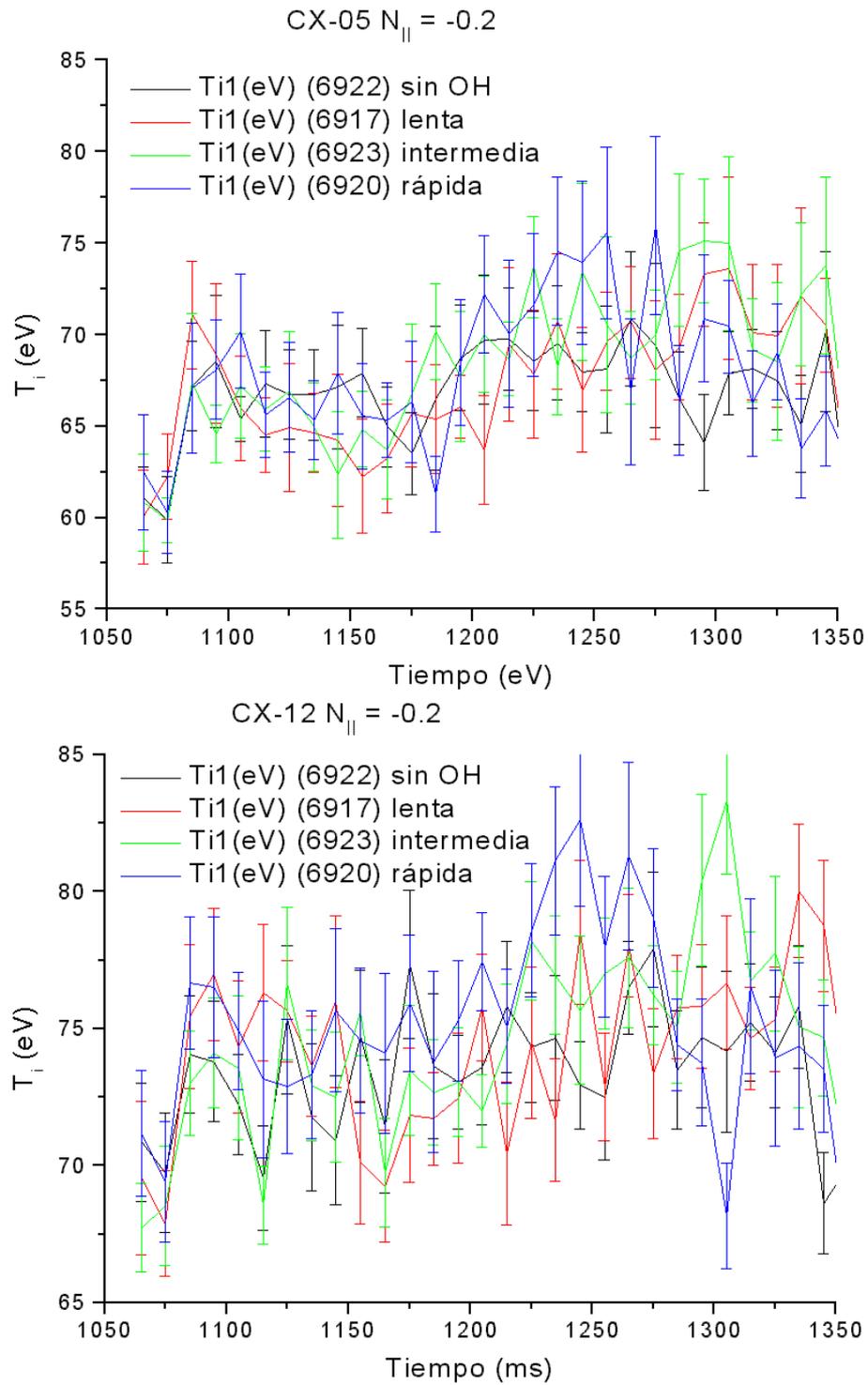


**Fig. 6.7.** Descargas estudiadas en el caso de introducir  $N_{\parallel} = +0.2$ . Se muestran los resultados de los dos espectrómetros para las cuatro rampas de corriente diferentes.

$N_{\parallel} = -0.2$

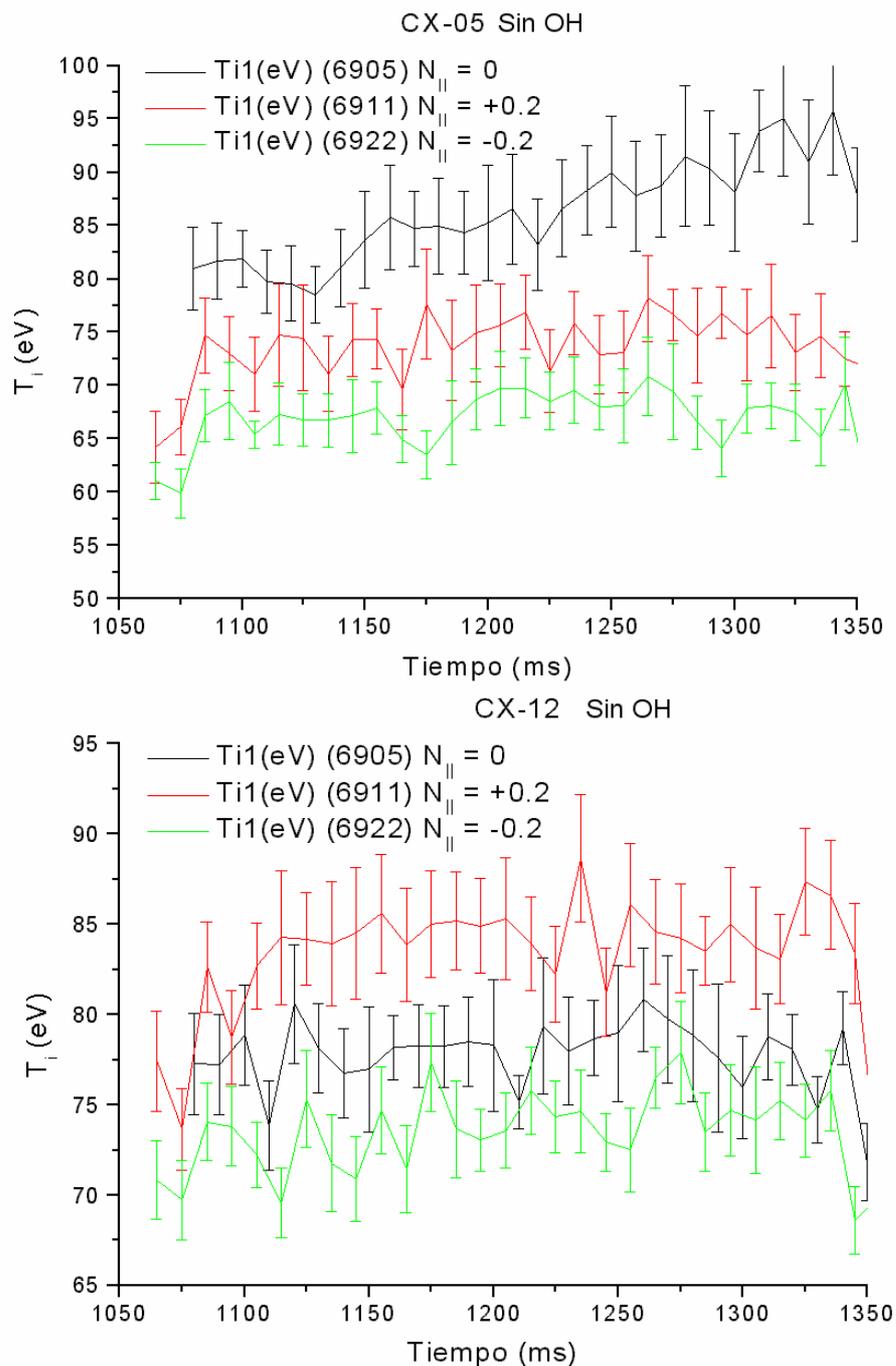
En este caso, igual que el anterior los dos espectrómetros miran a puntos simétricos y la energía mínima de los iones es de 150 eV para todas las descargas. Las densidades son prácticamente

iguales en todas las descargas pero se produce una subida en la descarga con rampa rápida a partir de 1250 ms.



**Fig. 6.8.** Descargas para el caso  $N_{||} = -0.2$ . Se muestran los resultados de los dos espectrómetros.

En este caso no se aprecian diferencias significativas entre las diferentes temperaturas, incluso en el caso de la rampa rápida la bajada de temperatura de los iones es menos clara que en los anteriores casos. De todos modos si se tiene en cuenta la densidad (y como la temperatura iónica normalmente aumenta al aumentar la densidad), ésta crece en la rampa rápida pero la temperatura iónica no lo hace.



**Fig. 6.9.** Temperatura iónica sin corriente inductiva para los dos espectrómetros.

## Sin OH

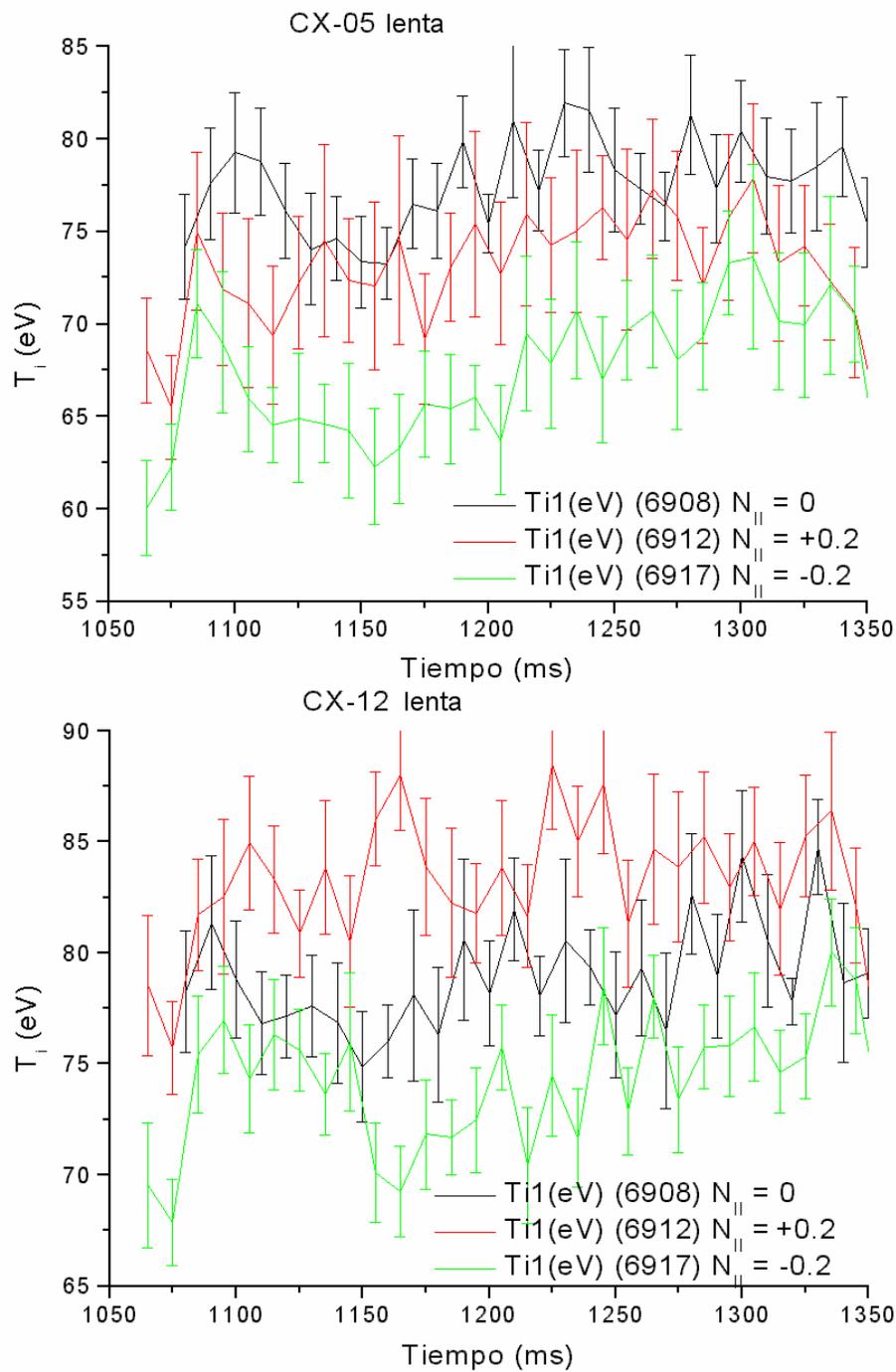
En estas descargas la única corriente presente es la corriente no inductiva debido al diferente coeficiente de refracción. Para  $N_{\parallel} = 0$  el punto en el que se calcula la temperatura de los iones es 0.05 para el espectrómetro de 5 canales y 0.35 para el Acord12, en este caso la mínima energía a la que se cuentan los neutros es de 200 eV. En los otros dos casos la posición es  $\pm 0.1$  y la energía mínima 150 eV. Las densidades son ligeramente diferentes, sobretodo en la parte final de la descarga.

En este caso se ve que la temperatura de la descarga con  $N_{\parallel} = -0.2$  es menor que las otras dos en los dos casos, pero también lo es la densidad electrónica. En el caso de la descarga con  $N_{\parallel} = 0$  se ve que la temperatura medida por el espectrómetro de 5 canales es la mayor mientras que en el Acord12 es la intermedia. Esto puede ser por la diferente posición de los espectrómetros, pues a pesar de que se ha dicho que la temperatura iónica es esencialmente plana, en el centro (para radios efectivos menores de 0.1) sí que se nota un cierto aumento de la temperatura de los iones.

## Rampa lenta

Para esta colección de casos los espectrómetros se encuentran todos en la misma posición, mirando a puntos simétricos del plasma. La energía mínima a la que cuenta los neutros la descarga con  $N_{\parallel} = 0$  es de 200 eV y en las otras dos es de 150 eV. La densidad en las tres descargas es muy similar.

En este caso también la temperatura de la descarga con  $N_{\parallel} = -0.2$  es menor que las otras dos, aunque en estas descargas la densidad sea muy similar. También se observa el fenómeno en que la temperatura de los iones de la descarga con  $N_{\parallel} = 0$  es la mayor para el espectrómetro de 5 canales pero intermedia para el Acord12. En este caso puede ser debido a que cuenta neutros de mayor energía con lo que la temperatura resultante también es ligeramente superior.



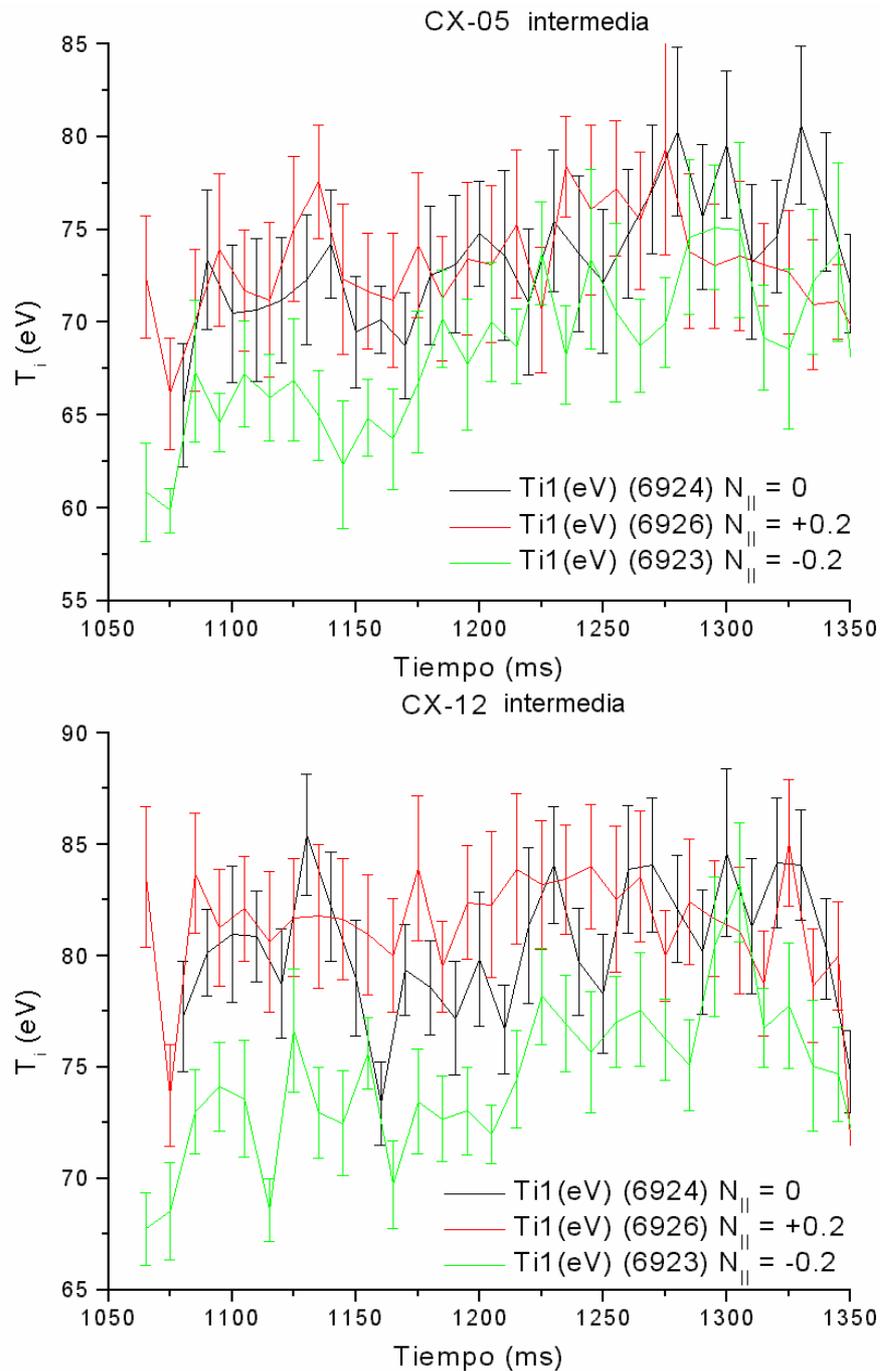
**Fig. 6.10.** Temperatura iónica para el caso de una rampa de corriente lenta con diferente índice de refracción para el calentamiento. Se muestran los dos espectrómetros.

### Rampa intermedia

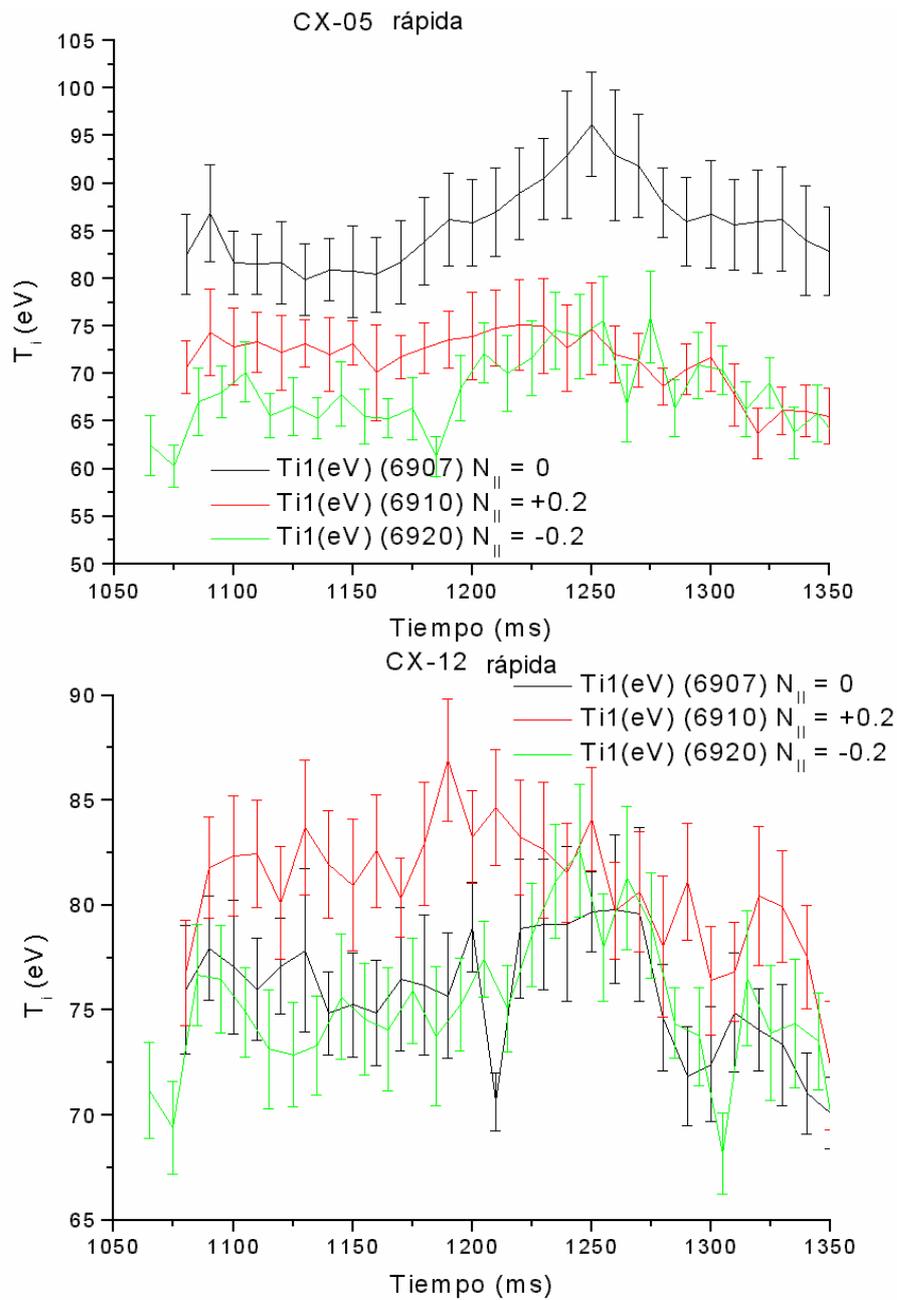
En este caso las tres descargas analizan neutros del mismo punto (el lugar donde los dos espectrómetros miran a posiciones simétricas con radio efectivo 0.1) y con igual energía mínima,

en este caso de 150 eV. Pero las densidades de las descargas son ligeramente diferentes, siendo la mayor la que tiene  $N_{\parallel} = +0.2$  y menor la de  $N_{\parallel} = -0.2$ .

En este caso puede observarse también como la temperatura para  $N_{\parallel} = -0.2$  es menor que las otras dos pero con menos claridad, además la densidad de esta descarga es menor que las otras, con lo que no es posible deducir nada respecto a la influencia del espejo en la temperatura iónica.



**Fig. 6.11.** Temperatura iónica calculada con los dos espectrómetros para una rampa de corriente intermedia.



**Fig. 6.12.** Temperatura iónica para la rampa rápida. Se muestran los dos espectrómetros.

### Rampa rápida

En esta serie de descargas la posición de los espectrómetros es simétrica (radio efectivo 0.1) para los casos en que  $N_{||} = +0.2$  y  $N_{||} = -0.2$ , mientras que en el caso  $N_{||} = 0$  el de 5 canales analiza a un radio efectivo de 0.05 y el Acord12 a 0.35. También hay diferencia en cuanto a la menor energía que cuentan los analizadores, para  $N_{||} = 0$  ésta es de 200 eV y para los otros dos casos es

de 150 eV. Las densidades son muy similares en los tres casos, separándose al final de las descargas.

En este grupo de descargas se observa que para el espectrómetro de 5 canales la temperatura para  $N_{\parallel} = 0$  es netamente superior a las otras dos, mientras que en el Acord12 esto no ocurre, siendo similar a la de  $N_{\parallel} = -0.2$ . Esto puede ser debido al diferente punto que mira (más central en el espectrómetro de 5 canales) y a que las energías que analiza son mayores. En el Acord12 se puede observar una pequeña subida de la temperatura, para después caer alrededor de 1250 ms, este efecto no es tan claro en el caso de  $N_{\parallel} = +0.2$ . En el espectrómetro de 5 canales se puede observar este comportamiento pero minimizado, siendo más difícil de ver la subida y bajada.

#### 6.3.4.- *Discusión*

En los casos estudiados no se ven efectos claros de aumento o disminución de la temperatura iónica con la variación de la corriente en el plasma. Quizás en el caso de una rampa rápida sí se observa una bajada de la temperatura iónica, a pesar del aumento de la densidad electrónica de línea, cuando por norma general al producirse un aumento de la densidad también aumenta la temperatura de los iones.

En el caso de la variación del ángulo del espejo de calentamiento no hay efectos apreciables en la temperatura iónica debido a que el movimiento del espejo modifica muy poco el valor de la corriente del plasma, siendo su efecto enmascarado por la variación de corriente producida por las bobinas de calentamiento óhmico.

## **6.4.- Conclusiones**

Una aportación original de esta tesis ha sido el estudio las derivas poloidales de los iones en la cámara de vacío de TJ-II para campos magnéticos estándar e invertidos, en dos configuraciones magnéticas diferentes. A partir de los flujos de neutros se ha calculado la temperatura iónica en cuatro casos diferentes.

Un resultado del estudio de las derivas poloidales ha sido que los perfiles de temperatura iónica son planos para plasmas de baja densidad de línea. Si la densidad aumenta este perfil pasa a ser no simétrico, siendo la temperatura mayor para radios negativos del plasma. Esta asimetría puede explicarse por el diferente campo eléctrico del plasma.

Aprovechando una serie de descargas realizadas en TJ-II se ha intentado ver la posible correlación de la inducción de corriente en el plasma con la temperatura de los iones. Esta inducción de corriente provoca un aumento (o disminución) del confinamiento pero con los datos estudiados en este capítulo no se ha podido observar un aumento o disminución claro de la temperatura de los iones.

Se ha comprobado que en la serie de descargas estudiada no hay grandes diferencias radiales en la temperatura iónica, quizás se note un aumento de la temperatura de los iones para valores muy pequeños del radio efectivo del plasma, por debajo de 0.1.