

## Capítulo 7

# Transporte iónico en TJ-II

## 7.- Transporte iónico en TJ-II

Después de haber estudiado el transporte de calor de los electrones y realizar diversas medidas con el espectrómetro de intercambio de carga se pasa a estudiar el transporte de calor de los iones en los plasmas de TJ-II. Para ello se utilizará un perfil de temperatura iónica medido con este diagnóstico.

### 7.1.- Datos experimentales

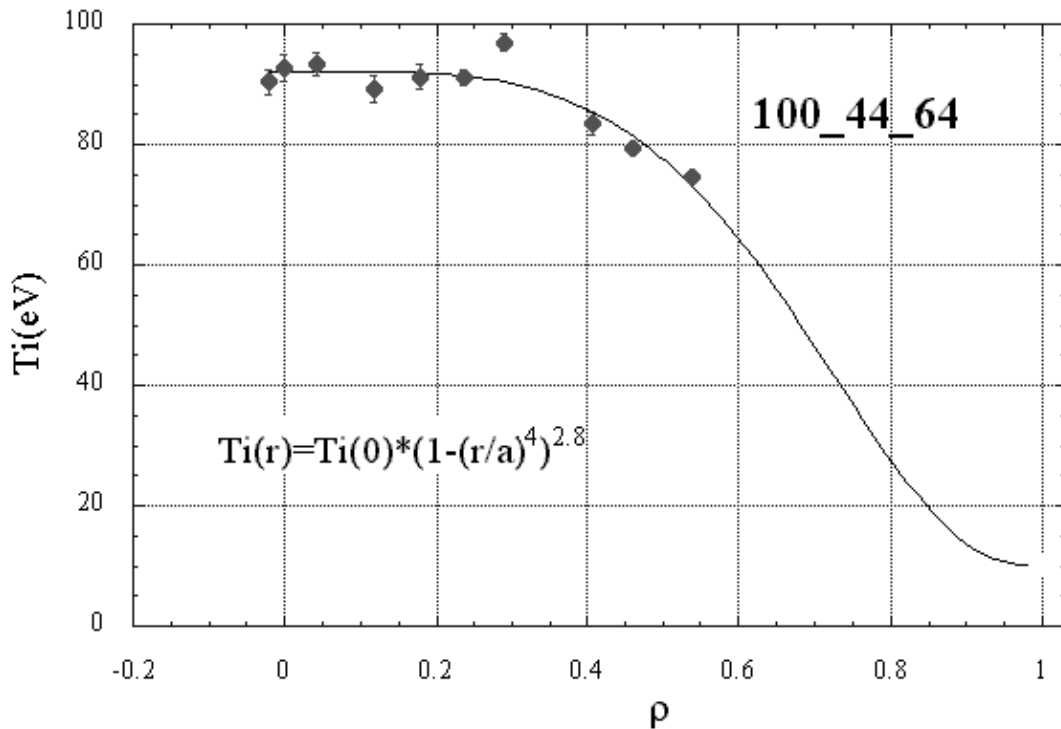
Para calcular el perfil de temperatura de los iones se ha utilizado una serie de descargas reproducibles en las que se variaba la posición y energía que contaban los analizadores. El variar la energía sirve para obtener un mayor número de puntos con los que realizar la regresión lineal a partir de la cual se calcula la temperatura de los iones. El hecho de necesitar varias descargas reproducibles para obtener un solo punto de temperatura y varias más para tener un perfil hace que éste no sea muy exhaustivos y se deba escoger bien los puntos que analiza el espectrómetro durante el experimento.

En el caso que aquí se presenta se tiene un perfil radial formado por 10 puntos del plasma, todos en un radio efectivo menor de 0.65. La temperatura en el borde se ha supuesto igual a la temperatura de los electrones, que se mide con una sonda de Langmuir. Además se supone que la temperatura de los iones decaerá junto con la densidad. Se ha realizado un ajuste por mínimos cuadrados para extender el perfil de la temperatura de los iones a todo el radio efectivo, la función resultante es la siguiente:

$$T_i(r) = T_i(0) \left( 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^4 \right)^{2.8} \quad (7.1)$$

Donde  $r$  es el radio menor y  $a$  el radio medio menor máximo. En la figura 7.1 se puede ver el perfil radial de la temperatura de los iones en la serie de descargas. La temperatura es aproximadamente plana en el centro con un valor ligeramente menor de 100 eV cayendo hasta

10 eV en el borde, pero ya se ha dicho que no se tiene constancia experimental de esta disminución.



**Fig. 7.1.** Perfil de la temperatura iónica medido para realizar los estudios de transporte. Se indican los puntos experimentales así como la función que ajusta el perfil a todo el radio del plasma. [Cas 02b]

Las descargas se realizaron en la configuración 100\_44\_64, una configuración grande con buenas propiedades de estabilidad y confinamiento, características importantes para obtener descargas reproducibles. La configuración tiene un volumen  $1.16 \text{ m}^3$  y un radio menor medio de 20 cm. El valor de la transformada rotacional ( $v/2\pi$ ) en el centro es de 1.551 subiendo hasta 1.678 en el borde, no presentando ningún valor racional dentro del plasma.

El calentamiento es de 300 kW por ondas ciclotrón electrón lanzadas de manera perpendicular al plasma y en el centro. El gas de trabajo es hidrógeno que se inyecta delante de los colimadores del espectrómetro para obtener más señal en los detectores. La temperatura electrónica en el centro es de casi 1.1 keV y la densidad electrónica medida con el *scattering Thompson* es de  $0.65 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  en el centro, subiendo hasta  $0.8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , resultando un perfil ahuecado. La densidad cae a partir de un valor del radio efectivo de 0.6 aproximadamente. Para los valores de densidad

y temperatura se han utilizado los datos de una sola de las descargas, ya que al ser todas reproducibles los valores serán similares dentro de la incertidumbre experimental.

## 7.2.- Simulaciones con PRETOR-Stellarator

Los datos obtenidos experimentalmente se han introducido en el código de cálculo para obtener los perfiles radiales de difusividad térmica, tanto eléctrica como iónica. Para ello se procura que los perfiles simulados de las temperaturas y densidades sean lo más parecidos posibles con los experimentales. En este caso es especialmente importante el perfil de la densidad de los electrones pues la temperatura de los iones depende fuertemente de la densidad, además en la actualidad la única fuente de calentamiento de los iones en los plasmas de TJ-II es por colisiones con los electrones, término que depende de la densidad de los electrones:

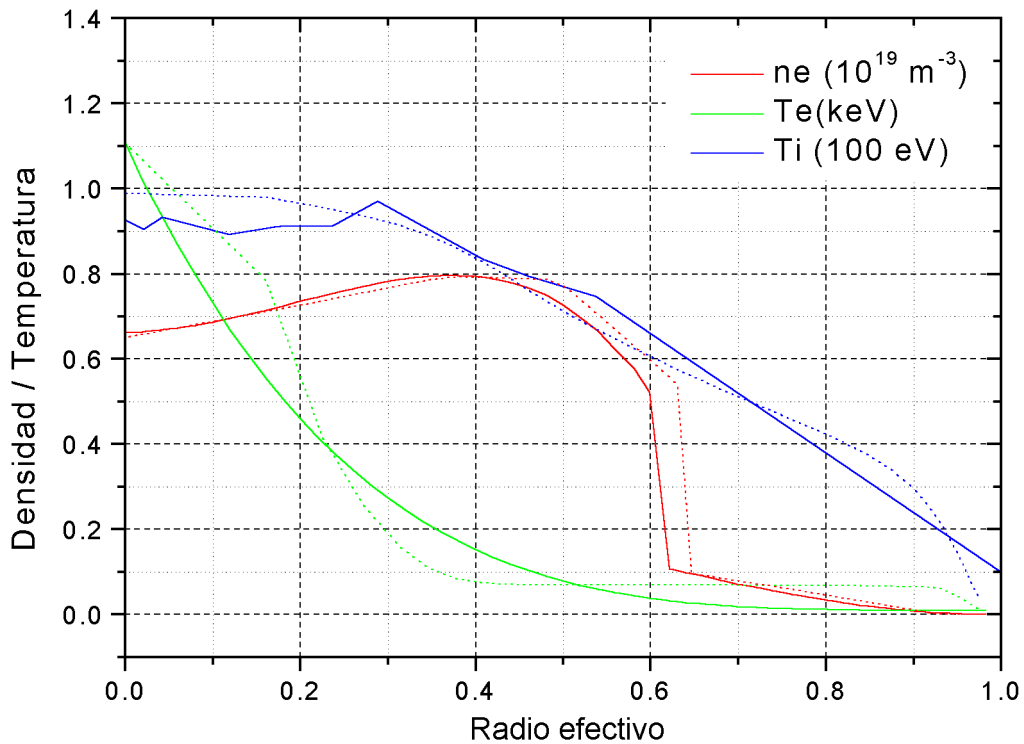
$$P_{ei} = \nu_e n_e (T_e - T_i) \quad (7.2)$$

Donde  $P_{ei}$  es la densidad de potencia transferida por los electrones a los iones;  $\nu_e$  es la frecuencia de colisión de los electrones con los iones;  $n_e$  la densidad de electrones; finalmente  $T_e$  y  $T_i$  son la temperatura de los electrones e iones respectivamente.

Para simular correctamente la densidad de los electrones se introdujo un cambio en el código PRETOR-Stellarator de manera que no se calcula de densidad de los electrones sino que se introduce la experimental a partir de un fichero externo, dejando evolucionar libremente el resto de parámetros. Los perfiles experimentales y simulados con PRETOR-Stellarator están representados en la figura 7.2. En este caso para el perfil de la temperatura iónica se han utilizado los puntos experimentales y no la función de ajuste.

Para comprobar el ajuste entre los datos experimentales y simulados por el código se ha calculado la desviación cuadrática media para las dos temperaturas. En el caso de la temperatura de los electrones el error, utilizando la ecuación (5.1), da un resultado de un 15.9%, similar a las obtenidas en las descargas analizadas en el capítulo 5 de la presente tesis. Para la temperatura de los iones este error, calculado de la misma manera, es de 8.4%, un error muy bajo. En este último

caso solo se han tenido en cuenta los valores para un radio efectivo menor de 0.5, que es la zona donde se tienen resultados experimentales.



**Fig. 7.2.** Valores experimentales (línea continua) y simulados con PRETOR-Stellarator (línea punteada) de los perfiles de temperatura electrónica, temperatura iónica y densidad de los electrones.

Para simular la difusividad térmica de los electrones se ha utilizado el modelo LHD experimental, el normalmente usado para TJ-II. Para el cálculo de la conductividad térmica de los iones se ha utilizado el modelo Hinton-Hazeltine [Hin 76] con corrección Chang-Hinton [Cha 82]. Este es un modelo neoclásico modificado que parece ir bien para las características del plasma de TJ-II que se tiene en este estudio.

Con este modelo la difusividad térmica de los iones viene dada por [Fon 01]:

$$\chi_i = (1 + \alpha q^2) \nu_i \rho_i^2 \quad (7.3)$$

Donde  $q$  es el factor de seguridad;  $\rho_i$  es el radio de Larmor de los iones;  $\nu_i$  la colisionalidad de los iones; y  $\alpha$  un parámetro del modelo. Estos parámetros vienen definidos en PRETOR-Stellarator como:

$$\rho_i = 4.57 \times 10^{-3} \frac{M_i^{1/2} T_i^{1/2}}{B_t} \quad (7.4)$$

Donde  $M_i$  es la masa de los iones,  $T_i$  la temperatura de los iones y  $B_t$  el campo magnético toroidal. La colisionalidad se define como:

$$\nu_i = \frac{1}{\sqrt{2} 42895} \left( \frac{T_e}{T_i} \right)^{3/2} \frac{n_i Z_{eff}}{n_e} \frac{1}{\sqrt{M_i}} \frac{1.53 \times 10^4 n_e \ln \Lambda}{T_e^{3/2}} \quad (7.5)$$

En esta ecuación  $T_e$  es la temperatura de los electrones;  $T_i$  la de los iones;  $n_e$  la densidad electrónica;  $n_i$  la de los iones;  $Z_{eff}$  es la carga efectiva del plasma;  $M_i$  la masa de los electrones; y  $\ln \Lambda$  es el logaritmo columbiano que viene definido por:

$$\ln \Lambda = 1 - \frac{1}{17.25} \ln \frac{n_e^{1/2}}{T_e} \quad (7.6)$$

y definiendo [Hin 76]:

$$\alpha = 0.66 \left[ \frac{K}{1 + 1.03 \nu_{*i}^{1/2} + 0.31 \nu_{*i}} + \frac{\epsilon^{3/2} 1.77 \nu_{*i} \epsilon^{3/2}}{1 + 0.74 \nu_{*i} \epsilon^{3/2}} \right] \quad (7.7)$$

En esta ecuación  $\epsilon$  es el inverso de la relación de aspecto;  $K$  es una constante que depende del modelo y  $\nu_{*i}$  es una colisionalidad corregida:

$$\nu_{*i} = \frac{R_0 q}{\epsilon^{3/2} \nu_{th,i}} \nu_i \quad (7.8)$$

Donde  $R_0$  es el radio mayor del plasma; y  $v_{th,i}$  es la velocidad térmica de los iones, que viene definida como:

$$v_{th,i} = 3.10 \times 10^5 \frac{T_i^{3/2}}{A^{1/2}} \quad (7.9)$$

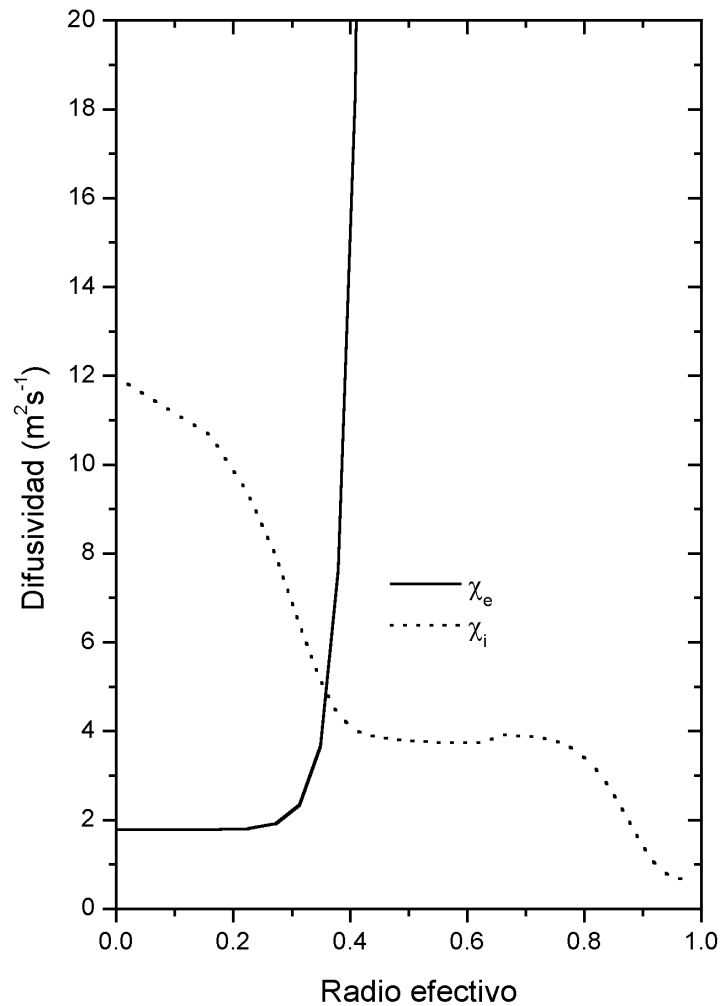
En el caso del modelo Hinton-Hazeltine el valor de  $K$  es 1 pero en la corrección de Chang-Hinton para relaciones de aspecto finitas se introduce el siguiente valor dependiente del valor del inverso de la relación de aspecto del dispositivo [Cha 82]:

$$K = 1 + 2.85\epsilon^{1/2} - 2.33\epsilon \quad (7.10)$$

Finalmente la difusividad térmica iónica obtenida a partir de estas ecuaciones es multiplicada por un parámetro que permite ajustar la temperatura simulada a la experimental. Este parámetro se introduce en PRETOR-Stellarator y es diferente para cada perfil de temperatura iónica.

En todas las ecuaciones anteriores las constantes numéricas que aparecen son las resultantes por la elección de unidades de PRETOR-Stellarator.

En la figura 7.3 se presentan los resultados de las difusividades térmicas de los electrones e iones obtenidas con PRETOR-Stellarator. Puede verse como la difusividad térmica de los electrones es la típica de los plasma de TJ-II, valor bajo en el centro (en este caso alrededor de  $2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ) y subiendo en el borde. Por otra parte la difusividad térmica de los iones presenta un perfil totalmente diferente, con un máximo en el centro y monótonamente decreciente hasta un radio efectivo de 0.6 aproximadamente. El valor de la difusividad térmica de los iones es alto en el centro, de unos  $12 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  y va decayendo hasta llegar a una región plana con un ligero máximo relativo para a continuación volver a caer hasta un valor de  $0.2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .



**Fig. 7.3.** Difusividad térmica de los electrones e iones calculada con PRETOR-Stellarator.

El mismo perfil ha sido simulado con PROCTR para comparar los resultados de los dos códigos introduciendo los mismos modelos en el cálculo de las difusividades térmicas. En la figura 7.4 se muestra el perfil de la difusividad térmica de los iones obtenida con PROCTR. El valor central de la difusividad térmica es similar al obtenido con PRETOR-Stellarator pero en este caso la difusividad térmica presenta el máximo relativo mucho más acusado, esta diferencia entre los dos códigos no es muy relevante pues se produce en puntos donde no se tienen valores experimentales para comparar resultados de ambos códigos.



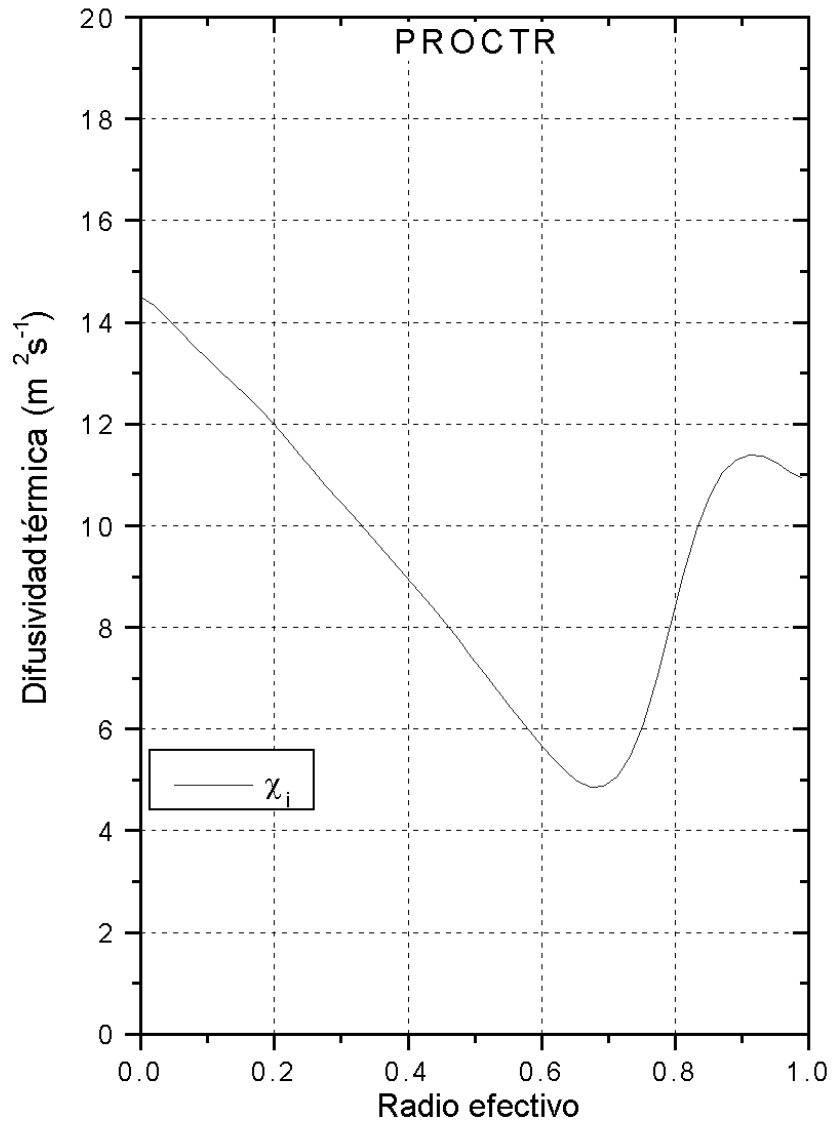


Fig. 7.4. Valor de la difusividad térmica de los iones calculada con PROCTR.

### 7.3.- Discusión

El perfil de la difusividad térmica de los iones es monótonamente decreciente en el centro para que resulte un perfil plano de la temperatura de los iones, después ya no es así puesto que la temperatura empieza a decrecer, según las hipótesis hechas para la realización de este estudio. El máximo central es debido a la pequeña colisionalidad en el centro del plasma haciendo que el valor de la difusividad térmica de los iones sea alta según el modelo Hinton-Hazeltine utilizado en este estudio, que hace que la temperatura sea aproximadamente igual en esos puntos. Como la temperatura es decreciente a partir de un radio efectivo de 0.6 aproximadamente, la difusividad térmica deja de disminuir, aquí los resultados de los dos códigos difieren porque la temperatura simulada de los iones en los dos códigos también es ligeramente diferente.

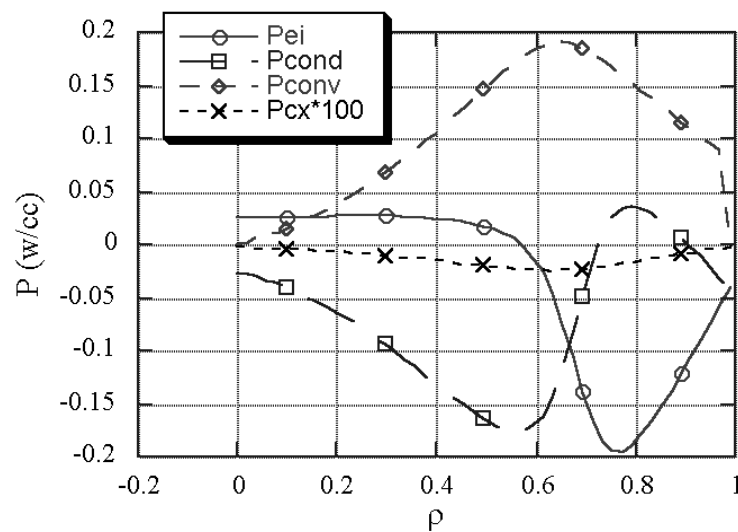


Fig. 7.5. Balance de potencia obtenido con PROCTR. [Cas 2b]

En este caso la única fuente en el balance de potencia de los iones es el calentamiento por colisiones de los electrones con los iones. Esta fuente en el centro es pequeña pues la colisionalidad de los electrones con los iones también es baja en ese punto. El máximo relativo que presenta la difusividad térmica simulada con PROCTR es debida a que en ese punto la colisionalidad es máxima, con lo que también la fuente de potencia será alta y para evacuar el calor será necesaria una alta difusividad térmica. En cuanto al perfil simulado con PRETOR-

Stellarator, que presenta un máximo mucho menor puede deberse a que la colisionalidad aumenta, pero como la densidad de los electrones baja apreciablemente quizás pueda compensar más el efecto del aumento de colisionalidad en ese punto, la diferencia entre los dos códigos puede ser por el diferente tratamiento de la densidad y el cálculo de la colisionalidad.

Por otra parte la única fuente de pérdida de potencia en el centro es la difusividad térmica de los iones, que depende del gradiente de temperatura, como este gradiente es aproximadamente nulo en el centro resulta la alta difusividad térmica que decrece cuando va aumentando el gradiente de temperatura.

En la figura 7.5 se muestra el perfil de balance de potencia obtenido con PROCTR, en ella se ve que los electrones calientan a los iones en el centro y en el borde sucede a la inversa, de todas maneras en el cómputo global del balance de potencia resulta que los iones son calentados por los electrones. También puede observarse que las pérdidas por intercambio de carga son despreciables en estas descargas, con lo que la asunción de que el único término de pérdida es la difusividad térmica se puede considerar correcta.

#### **7.4. - Conclusiones**

En este capítulo, utilizando un perfil experimental de temperatura iónica, se ha realizado un estudio del transporte de los iones en el plasma de TJ-II. Al no tener datos experimentales a lo largo de todo el radio efectivo, el perfil de la temperatura se ha completado hasta el borde haciendo las siguientes hipótesis: el perfil de temperatura de los iones tiene la misma forma que el de la densidad y la temperatura de los iones en el borde es igual a la de los electrones.

Para realizar el estudio se ha utilizado PRETOR-Stellarator, es la primera vez que se utiliza este código para el estudio del transporte de los iones, con lo que se ha tenido que comprobar que todos los modelos implementados fueran los correctos. Una aportación novedosa ha sido la introducción de la densidad experimental de los electrones, pues el término fuente es muy sensible a la densidad electrónica.

Los resultados de PRETOR-Stellarator se han comparado con los obtenidos con PROCTR, hay buen acuerdo entre ellos dentro del rango en donde se tienen valores experimentales, fuera de este radio los resultados divergen pero no se puede asegurar cual de los dos códigos es el correcto por no haber datos experimentales con los que comparar.

La difusividad térmica de los iones resulta ser muy alta en el centro y va decayendo monótonamente mientras la temperatura de los iones es plana. Después presenta un máximo relativo, mucho más acusado en la simulación de PROCTR, en un radio efectivo de aproximadamente 0.7 que podría explicarse por el aumento de la colisionalidad en ese punto.

El balance de potencia indica que los electrones calientan a los iones en el centro, mientras en el borde sucede lo contrario. De todos modos en el balance global del plasma los iones son calentados por los electrones, siendo este resultado congruente con el tipo de calentamiento.