

Capítulo 7

Simulación de descargas del heliac flexible TJ-II con PRETOR-Stellarator

En este capítulo se presentan las simulaciones realizadas con PRETOR-Stellarator de descargas del heliac flexible TJ-II. El objetivo de este estudio es comprobar que las modificaciones introducidas en PRETOR permiten utilizar esta nueva versión del código para simular descargas de stellarators, además de verificar la corrección de sus resultados. Por este motivo los resultados de la simulación se comparan con los datos experimentales disponibles. Una vez comprobado que el código reproduce los valores experimentales de descargas reales éste podrá ser aplicado al estudio de stellarators.

Todos los códigos de simulación realizan aproximaciones en sus cálculos, una de las más importantes es el promedio de las magnitudes físicas sobre una superficie magnética. Por este motivo es importante comparar los resultados obtenidos de varios códigos distintos. De esta forma los resultados de la simulación de PRETOR-Stellarator en diversas descargas del TJ-II se comparan con los valores obtenidos con PROCTR, un código de transporte ampliamente utilizado en el estudio del transporte del TJ-II y de otros stellarators.

Las descargas del TJ-II también se simulan con la versión inicial de PRETOR para tokamaks con el fin de comprobar el grado de exactitud con que reproduce los datos experimentales de este dispositivo.

El heliac flexible TJ-II (apartado 5.2) es un dispositivo con un radio mayor de 1.5 m y un radio menor medio comprendido entre 0.1 y 0.22 m. Un campo magnético de 1 T se genera con el sistema de bobinas toroidales, poloidales y verticales. Las principales propiedades de este dispositivo son: fuerte variación helicoidal de su eje magnético, propiedades magnetohidrodinámicas (MHD) muy favorables con potencial para la operación con alto valor de beta y amplia flexibilidad de operación, es decir, el valor de la transformada rotacional varía entre un amplio rango de valores [Ale99].

El conjunto de diagnósticos del TJ-II proporciona la información necesaria del plasma: los perfiles de temperatura y densidad de electrones se obtienen con el Scattering Thomson en un único instante de la descarga. La evolución de la temperatura de los electrones se obtiene por emisión electrón-ciclotrón ECE (*Electron Cyclotron Emission*) en ocho posiciones diferentes. La densidad de línea se obtiene con un interferómetro mientras que la densidad en el borde se mide mediante sondas de Langmuir. El contenido total de energía del plasma se mide con las bobinas diamagnéticas y la radiación de potencia por una matriz de bolómetros.

7.1 Descargas de la primera campaña experimental

Los primeros plasmas del TJ-II se obtuvieron usando un único girotrón con una potencia ECRH en torno a 250 kW con una longitud de pulso de $\Delta t \approx 80 - 200$ ms. La potencia es introducida a través de un puerto situado en la parte inferior en un ángulo toroidal $\phi = 25^\circ$ mediante la primera línea de transmisión cuasi-óptica (QTL1), esta línea permite la inyección perpendicular al campo magnético. La densidad de potencia depositada es de 1 W cm^{-3} , la potencia no absorbida directamente por el plasma es absorbida después de unos pocos pasos a través de la columna de plasma [Ale99b].

Con estas características se han obtenido descargas cuasi-estacionarias de hasta 200 milisegundos de duración. La densidad media de las primeras descargas está comprendida entre 0.5 y $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, el pico de la temperatura electrónica en el eje se encuentra entre 0.4 y 0.8 keV y la temperatura en el borde es de $10 - 20 \text{ eV}$. La energía contenida en el plasma varía desde los 200 J para los plasmas más pequeños ($V \approx 0.34 \text{ m}^3$) hasta más de 1 kJ para las configuraciones de mayor volumen ($V = 1.2 \text{ m}^3$) [Ale99]. Para estas configuraciones el tiempo de confinamiento de la energía es de aproximadamente 4 ms .

Los componentes en contacto con el plasma son de acero inoxidable. La interacción entre el plasma y la pared está localizada en región alrededor del Hard Core, es decir en el *groove*. Antes de los experimentos se hace el vacío en la cámara hasta unos niveles de $1 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ por medio de un conjunto de turbobombas. Para el acondicionamiento de la pared se realiza durante toda la noche una descarga de limpieza de helio.

7.1.1 Descripción de la descarga #955

Un primer análisis de los resultados de PRETOR-Stellarator se realiza sobre la descarga número 955 de TJ-II. Esta descarga corresponde a las primeras campañas experimentales y se realizó en junio de 1998. Su configuración magnética, determinada por la corriente que circula por el sistema de bobinas, es la 100_50_65. Estos tres números corresponden respectivamente a multiplicar por 10 la corriente (en kA) que circula por la bobina central, las bobinas helicoidales y por las bobinas verticales, en este caso, la corriente de la bobina circular es de 10 kA , por las bobinas helicoidales circulan 5 kA y por las verticales 6.5 kA .

El volumen de la columna de plasma es de 1.2 m^3 y su radio menor medio, correspondiente a un plasma toroidal de sección circular con el mismo volumen, es de 0.21 m . La potencia de calentamiento ECRH es de 250 kW inyectados al plasma a través de la primera línea de transmisión (QTL1). La densidad de electrones lineal media es de $0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ y la temperatura en el eje alcanza los 0.5 keV . Otras características principales de esta descarga se resumen en la tabla 7.1.

| <i>Parámetro</i> | <i>Valor</i> |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Radio mayor medio | 1.5 m |
| Radio menor medio | 0.21 m |
| Volumen | 1.26 m ³ |
| Potencia calentamiento ECRH | 250 kW |
| Campo magnético | 1 T |
| Temperatura electrónica en el eje | 0.5 keV |
| Densidad electrónica media | 0.5×10 ¹⁹ m ⁻³ |
| Transformada rotacional en el eje | 1.61 |
| Transformada rotacional en el borde | 1.73 |
| Potencia radiada | 150 - 210 kW |
| Energía total almacenada | ~ 1 kJ |
| Tiempo de confinamiento | ~ 4 ms. |

Tabla 7.1 Principales parámetros físicos de la descarga #955 del TJ-II [Ale99].

7.1.2 Valores e hipótesis

En las primeras descargas realizadas en el TJ-II existen diversas magnitudes que no se conocen con suficiente precisión y por lo tanto hay que realizar ciertas hipótesis sobre su valor.

- **Potencia radiada.** Se desconoce el valor de la potencia radiada, pero cálculos realizados indican que los niveles de radiación alcanzan valores entre el 60 y el 85% de la potencia absorbida [Cas99].
- **Perfil de potencia adicional ECRH.** La deposición de potencia se supone que se extiende en una región amplia del plasma siguiendo un perfil en forma de gaussiana con una anchura del 60% del radio menor.
- **Perfil de temperatura.** El perfil de temperatura se obtiene a partir de los pocos datos experimentales disponibles por ECE (Emisión Electrón-Ciclotrón) mediante su ajuste por mínimos cuadrados a la siguiente función [Cas98]

$$T_e(r) = T_0 \exp\left[-\left(\frac{\rho}{\Delta}\right)^\alpha\right] \quad (\text{Ec. 7.1})$$

donde T_0 , α y Δ son los parámetros a ajustar.

- **Perfil de densidad.** Sólo se conoce la densidad lineal media, obtenida por interferometría, y la densidad en el borde, por las sondas del limitador. El perfil de densidad se ajusta a la siguiente función [Cas98]

$$n(r) = n_0 (1 - \rho^\alpha)^\beta \quad (\text{Ec. 7.2})$$

en este caso los parámetros a ajustar son n_0 , α y β .

- **Concentración de impurezas.** Las principales impurezas que se consideran son el carbono y el oxígeno provenientes del aire y de los elementos depositados en la cámara de vacío. El acondicionamiento de la pared por medio de descargas de limpieza de helio reduce la concentración de impurezas en el orden del tanto por ciento. En consecuencia, estos primeros plasmas no son excesivamente limpios y el valor de la Z efectiva se supone que estará en torno a 2.

7.1.3 Simulaciones y resultados

A partir de los datos experimentales de la descarga, junto con las hipótesis asumidas, se procede a la simulación de esta descarga. La configuración magnética del equilibrio se ha obtenido en el CIEMAT [FDC99] mediante la ejecución del código VMEC (apartado 6.1), cuyo fichero de resultados proporciona 380 modos de Fourier (ecuación 6.1) para 39 superficies magnéticas que abarcan desde el eje a la última superficie magnética cerrada. El número de nodos tan elevado se debe a la forma especialmente compleja del plasma del TJ-II. Además se han introducido en el código, entre otros, los siguientes parámetros.

| <i>Parámetro</i> | <i>Valor</i> |
|--------------------------------------|--------------|
| Potencia ECRH | 0.25 MW |
| Posición de la resonancia | 0 |
| Ancho de la resonancia | 60 % |
| Potencia NBI | 0 MW |
| Z Impureza | 6 |
| Masa impureza | 12 |
| <i>Line radiation</i> (C_{line}) | 5 |
| <i>Ion losses</i> (C_{ion}) | 12 |
| Temperatura iónica en el borde | 10 eV |

Tabla 7.2 Principales parámetros utilizados para la simulación de la descarga #955 del TJ-II.

Para reproducir el perfil de la temperatura de los electrones se considera que la conductividad térmica presenta una dependencia global con la densidad y con la temperatura de acuerdo con la ley de escala LHD (Ec. 6.13). El valor de la conductividad, χ_e , en cada posición radial viene dado por la expresión del modelo empírico-LHD [How90] (apéndice II.1.7)

$$\chi_e = C_1 \frac{\chi_e^*}{\chi_{e,23}}; \quad \chi_e^* = \begin{cases} 1 + C_2 e^{-(1-\rho)/0.05} & \text{si } C_3 > 1 \\ 1 + C_2 (1 - \text{step}(\rho, C_3, 0.05)) & \text{si } C_3 < 1 \end{cases} \quad \text{(Ec. 7.3)}$$

donde $\chi_{e,23}$ es el valor de la conductividad en la posición radial correspondiente a 2/3 del plasma, $\rho = 2/3$. Este valor se obtiene de imponer que el flujo de energía, ϕ_e , dado por la

ecuación de difusión (Ec. 7.4) sea igual al flujo calculado a partir de la energía del plasma, el área de la superficie magnética y el tiempo de confinamiento dado por la ley de escala LHD

$$\phi_e = 1.6 \times 10^{-3} \langle (\nabla \rho)^2 \rangle n_e \chi_{e,23} \nabla T_e = - \frac{W}{\tau_{LHD} S} \Big|_{\rho=2/3} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Los factores C_1 , C_2 , C_3 son parámetros cuyos valores se escogen para ajustar el perfil de temperatura.

En la figura 7.1 se representa el perfil de la conductividad térmica de los electrones utilizada en la simulación de esta descarga, para los parámetros del modelo de transporte se utilizan los siguientes valores: $C_1=2.6$, $C_2=15$, $C_3=1$. El perfil de temperatura obtenido a partir de esta conductividad se representa en la figura 7.2 junto con el perfil experimental. La difusividad de los electrones se considera que sigue el modelo de Alcator (apéndice II.3.3).

Se observa un correcto acuerdo entre la temperatura experimental y la simulada con PRETOR-Stellarator en buena parte del plasma ($\rho < 0.8$). Mientras que en la región más cercana al borde, la simulación presenta mayores discrepancias respecto a los valores experimentales, estas diferencias son debidas a la dificultad de la simulación del comportamiento del plasma en el borde, región en la que la modelización de la concentración de neutros y de impurezas juegan un papel más relevante que en el centro del plasma y donde los modelos utilizados son menos realistas. Los modelos utilizados para la densidad de neutros no pueden tener en cuenta las asimetrías toroidal y poloidal.

Las pérdidas de potencia pueden tener diversos orígenes: los electrones radian por emisión bremsstrahlung o por radiación ciclotrón. Los neutros pueden radiar por series de excitación - desexcitación antes de ser ionizados completamente. Finalmente la radiación de líneas emite parte de la energía de los electrones al pasar estos de un nivel de energía a otro inferior. Las expresiones de las diferentes contribuciones a la potencia radiada están detalladas en el apartado 2.4. La potencia total radiada simulada en la descarga #955 es de 182 kW (el 73% de la potencia absorbida por ECRH) lo que está dentro de la previsión.

7.1.4 Comparación entre PRETOR-Stellarator y PROCTR

El código PRETOR y en general todos los códigos de simulación de plasmas realizan diversas simplificaciones y aproximaciones a la hora de modelizar los diferentes cálculos, la mayoría de ellas se han detallado en los apartados anteriores. Para poder valorar la bondad de las simulaciones realizadas con PRETOR-Stellarator, además de comparar sus resultados con los datos experimentales disponibles, también es interesante comparar los resultados con los obtenidos de otros códigos parecidos.

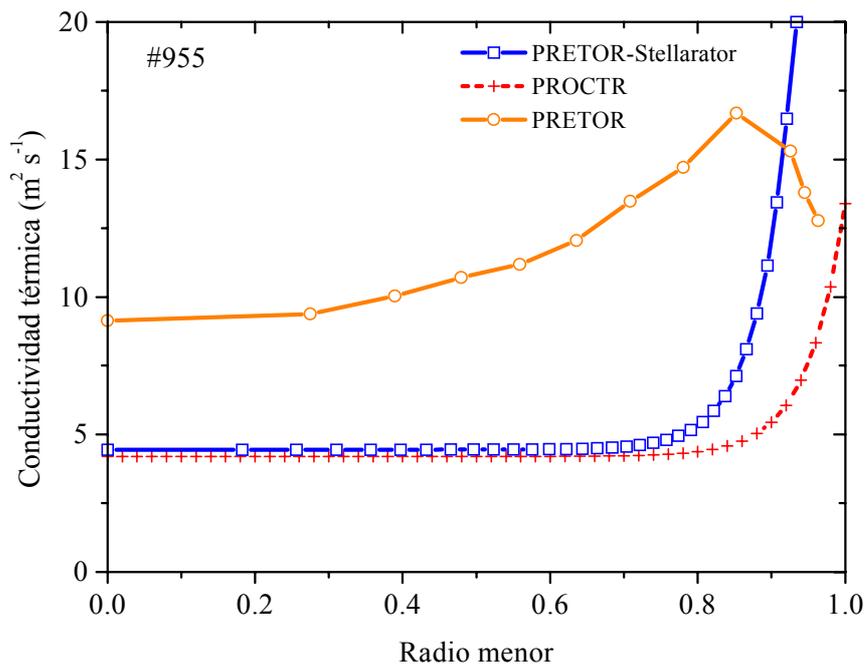


Figura 7.1 Perfil de la conductividad térmica utilizado en la simulación de la temperatura de la descarga #955 del TJ-II. El perfil obtenido con PRETOR-Stellarator se compara con los obtenidos con PROCTR y con la versión para tokamaks de PRETOR.

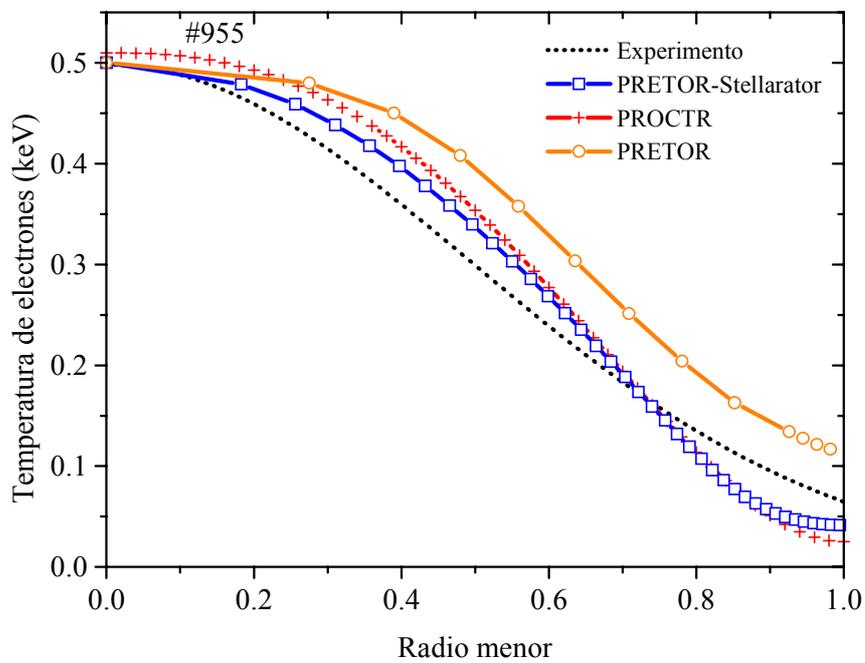


Figura 7.2 Perfil de temperatura electrónica de la descarga #955 del TJ-II. Se compara el perfil experimental con los resultados de la simulación de PRETOR-Stellarator y de PROCTR y con la versión para tokamaks de PRETOR.

Esta misma descarga ha sido simulada en el CIEMAT [FDC99] mediante la aplicación del código PROCTR, un código habitualmente utilizado en la simulación de stellarators y que ha sido aplicado al análisis de los primeros plasmas del TJ-II [Cas99]. La disponibilidad de otro código del transporte podrá permitir mayor flexibilidad a la hora de hacer estudios y se tendrá mayor versatilidad ya que se podrá modificar PRETOR-Stellarator para mejorar los modelos ya disponibles o añadirle nuevas características.

Los perfiles de conductividad térmica (figura 7.1) presentan la misma forma en ambos códigos aunque los usados en PRETOR presentan unos valores bastante más elevados cerca de la superficie del plasma. En el centro del plasma la conductividad de los electrones, $\chi_e(0)$, es muy parecida en ambos códigos: $4.4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la simulación con PRETOR y $4.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en el caso de PROCTR. Con estos perfiles de conductividad los perfiles de temperatura (figura 7.2) obtenidos son bastante parecidos entre ambos códigos, aunque el perfil de PROCTR es ligeramente más alto que el de PRETOR. En el borde del plasma ambos códigos muestran diferencias apreciables respecto del perfil experimental aunque el valor de la temperatura en la separatriz dado por PRETOR está entre el valor experimental y el dado por PROCTR.

7.1.5 Comparación entre PRETOR-Stellarator y PRETOR V2.2

La descarga #955 también se simula con la versión inicial de PRETOR para tokamaks. En la figura 7.2 se dibuja el perfil de temperatura de los electrones obtenido con la versión de PRETOR para tokamaks. Aunque el valor de la temperatura en el eje es similar a la experimental, el perfil a lo largo de todo el radio menor está bastante por encima del perfil experimental.

Otra fuente de error en la simulación de stellarators con la versión original de PRETOR es que se supone que el plasma es circular con lo que la geometría real del plasma no se tiene en cuenta. Esta simplificación tiene un importante efecto en la simulación de la difusividad térmica (figura 7.1). Mientras la temperatura en el eje es similar en ambos códigos la difusividad necesaria en PRETOR es un factor 2 más alta que la usada con PRETOR-Stellarator y PROCTR.

Para evitar tener un error debido a una división por cero en algún lugar del código es necesario introducir una pequeña corriente en el plasma. Los efectos debidos a la introducción de esta corriente se suponen muy pequeños ya que el valor de la corriente, 15 kA, y su contribución al calentamiento del plasma, 4 kW, son negligibles.

7.1.6 Resumen

El código PRETOR adaptado a la simulación de Stellarators, PRETOR-Stellarator, se ha aplicado a la simulación del transporte de la descarga #955, perteneciente a la primera campaña experimental del TJ-II. Los resultados de la simulación muestran que PRETOR-

Stellarator reproduce los perfiles experimentales de la temperatura cuando se escogen los parámetros de los modelos de transporte adecuados. En este caso se ha escogido un modelo empírico con dependencia de la densidad según la ley de escala LHD.

Esta misma descarga ha sido simulada mediante PROCTR, un código de transporte habitualmente utilizado en el estudio de stellarators. Los resultados obtenidos son compatibles con aquellos calculados con PRETOR-Stellarator teniendo en cuenta las incertidumbres existentes en los datos experimentales, como el perfil de potencia radiada, la Z efectiva, la densidad de impurezas, etc.

Los resultados de la simulación de esta descarga con la versión para tokamaks de PRETOR muestran las dificultades del modelo RLW de reproducir los perfiles experimentales de temperatura. También se observa una importante diferencia con los perfiles de la difusividad térmica obtenidos con PRETOR-Stellarator y PROCTR debido a los efectos de ignorar la geometría real del plasma.

7.2 Descargas #3088 y #3158

Los valores alcanzados por el plasma en estas descargas superan con mucho los parámetros alcanzados en los primeros plasmas. Así la temperatura máxima alcanzada en el eje magnético es de hasta 2.0 keV. La densidad ha sido incrementada hasta alcanzar valores de $1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ y la energía almacenada llega hasta los 1.5 kJ. Los dos girotrones instalados en el TJ-II suministran una potencia total de calentamiento ECRH de 600 kW. El valor de la Z efectiva se ha reducido respecto de las primeras campañas por las mejoras implantadas en el acondicionamiento de la pared [Ale00] con la introducción, antes de empezar la operación, de una descarga de limpieza de argón después de la descarga de helio. Otra mejora introducida es el calentamiento de la cámara de vacío a temperaturas entre 150 y 250 °C. Con este calentamiento se consigue que algunas impurezas de la pared de la cámara se evaporen y puedan ser extraídas por las bombas de vacío. El nivel de vacío alcanzado también es mayor con una presión en el rango de 5×10^{-8} mbar [Ale99b]. Las mejores condiciones de vacío y el mejor acondicionamiento de la cámara tienen una consecuencia directa en la reducción de la potencia radiada, alcanzando ahora valores inferiores al 20 % de la potencia inyectada.

7.2.1 Descripción de las descargas #3088 y #3158

Estas dos descargas se realizaron en marzo de 2000 y ambas corresponden a la configuración magnética 100_40_63, por lo que la comparación de sus resultados no se verá afectada por la forma de las superficies magnéticas. Su radio menor medio es de 19 cm y su volumen de 1.07 m^3 . Los perfiles de temperatura y densidad están obtenidos en un único instante de tiempo en cada descarga por el scattering Thomson. La evolución de la temperatura en ocho posiciones diferentes del plasma se monitoriza mediante ECE (*Electron Cyclotron Emission*)

La descarga #3088 dispone de 500 kW de potencia ECRH suministrada por las dos líneas de inyección (QTL1 y QTL2) pero la #3158 tiene una potencia adicional de sólo 300 kW suministrados únicamente por la línea QTL1. La segunda línea de transmisión QTL2 dispone de un espejo móvil, situado en el interior de la cámara de vacío, que permite variar la deposición de potencia y también inducir corriente por ECCD (*Electron Cyclotron Current Drive*) [Ale99b]. La deposición de potencia que se consigue con esta segunda línea está muy localizada cerca del eje magnético con una densidad de potencia hasta 25 W cm^{-3} .

Los perfiles experimentales corresponden al instante 1110 ms para la descarga #3088 y para la #3158 a los 1300 ms. En estos instantes de tiempo es en los que se dispara el scattering Thomson y se obtienen los perfiles de densidad y temperatura de electrones.

Los valores de los principales parámetros de estas descargas se recogen en la tabla 7.3

| Parámetro | #3088 | #3158 |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Radio mayor medio | 1.5 m | 1.5 m |
| Radio menor medio | 0.19 m | 0.19 m |
| Volumen | 1.07 m^3 | 1.07 m^3 |
| Potencia calentamiento ECRH | 500 kW | 300 kW |
| Campo magnético | 1 T | 1 T |
| Temperatura electrónica en el eje | 1.0 keV | 0.7 keV |
| Densidad electrónica media | $0.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ | $0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ |
| Transformada rotacional en el eje | 1.51 | 1.51 |
| Transformada rotacional en el borde | 1.61 | 1.61 |
| Potencia radiada | 57 kW | 64 kW |
| Energía total almacenada | 1.0 kJ | 0.9 kJ |
| Tiempo de confinamiento | 2.4 ms | 2.6 ms |

Tabla 7.3 Principales parámetros físicos de las descargas #3088 y #3158 del TJ-II

7.2.2 Valores e hipótesis

A diferencia de la primera campaña experimental en campañas posteriores se disponen de muchos más datos experimentales obtenidos directamente de los sistemas de diagnóstico.

- **Perfil de potencia adicional ECRH.** La deposición de la potencia adicional (figura 7.3) se encuentra muy localizada en una pequeña región alrededor del eje de unos 3-4 centímetros ($\rho < 0.2$) La absorción por *single pass* alcanza el 100% de la potencia inyectada [Cas99].

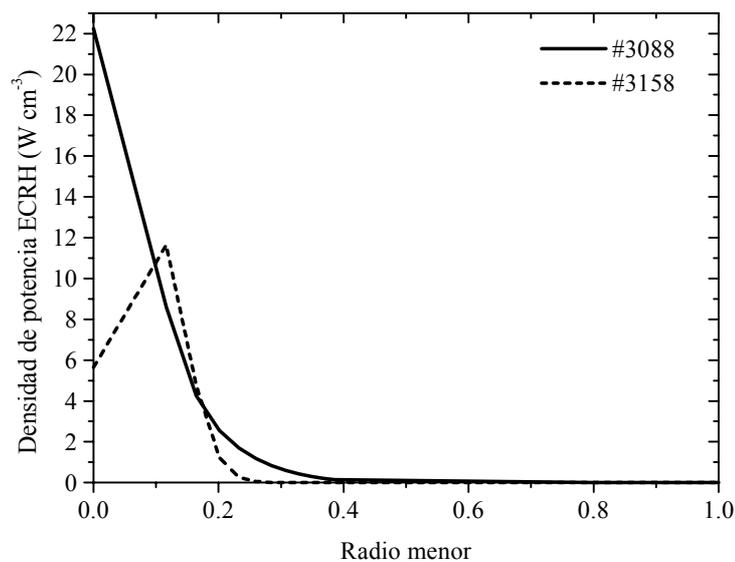


Figura 7.3 Densidad de deposición de potencia adicional ECRH de las descargas #3088 y #3158

- **Potencia radiada.** En estas descargas la potencia radiada se mide a partir de los bolómetros. Su valor se encuentra en el rango del 10 - 20 % de la potencia adicional por ECRH mientras que en los primeros plasmas alcanzaba valores comprendidos entre el 60 y el 85% de la potencia inyectada.
- **Perfil de temperatura.** En cada descarga se dispara el scattering Thomson que da el perfil de la temperatura de los electrones y la densidad electrónica. Para obtener la evolución temporal de la descarga se emplean el ECE (*Electron Cyclotron Emission*) con ocho canales localizados en posiciones distintas del radio menor.
- **Perfil de densidad.** Al igual que para la temperatura, la densidad de electrones se mide con el scattering Thomson en un único instante de la descarga. A lo largo de la evolución temporal sólo se dispone de las medidas de la densidad media de línea y de la densidad en el borde. En este caso el perfil de densidad se puede obtener mediante el ajuste dado en la ecuación 7.2.
- **Concentración de impurezas.** La concentración de impurezas se reduce respecto de las primeras descargas con un mejor acondicionamiento de la pared de la cámara. La principal impureza es el carbono y en menor proporción también hay presencia de oxígeno dentro del plasma.
- **Configuración magnética.** La configuración de estas descargas es la 100_40_63, la forma de las superficies magnéticas ha sido calculada mediante el uso del código VMEC [FDF00] y ha sido introducida en PRETOR. Se consideran 39 superficies magnéticas y para cada una de ellas se disponen de 380 nodos de desarrollo de Fourier.

7.2.3 Simulación y resultados

Con los datos disponibles y las hipótesis descritas en el apartado anterior ya se está en disposición de proceder a la simulación de estas descargas.

Para la simulación de los perfiles de temperatura, al igual que en la simulación de la descarga #955, se emplea para el cálculo de la conductividad térmica de los electrones el modelo LHD-Empírico (apéndice II.1.7) el cual presenta una dependencia global con la densidad del plasma de acuerdo con la ley de escala LHD. Los parámetros C_1 , C_2 , C_3 de este modelo utilizados en la simulación de estas dos descargas se muestran en la tabla 7.4. Otros parámetros introducidos en el código para realizar las simulaciones están indicados en la tabla 7.5.

| | #3088 | #3158 |
|-------|-------|-------|
| C_1 | 6.5 | 15 |
| C_2 | 40 | 250 |
| C_3 | 0.8 | 0.8 |

Tabla 7.4 Coeficientes del modelo de conductividad térmica de los electrones utilizados en la simulación con PRETOR-Stellarator de las descargas #3088 y #3158.

| Parámetro | #3088 | #3158 |
|--------------------------------|--------|--------|
| Potencia ECRH | 0.5 MW | 0.3 MW |
| Posición de la resonancia | 0 | 0 |
| Ancho de la resonancia | 15 % | 18 % |
| Potencia NBI | 0 MW | 0 MW |
| Z Impureza | 6 | 6 |
| Masa impureza | 12 | 12 |
| Line radiation (C_{line}) | 5 | 15 |
| Ion losses (C_{ion}) | 5 | 15 |
| Temperatura iónica en el borde | 10 eV | 5 eV |

Tabla 7.5 Principales parámetros utilizados para la simulación de la descarga #3088 y #3158.

En las figuras 7.4 se muestran los perfiles de temperatura simulados con PRETOR-Stellarator para las dos descargas estudiadas. Se observa que se han reproducido con bastante corrección el valor de la temperatura a lo largo del perfil de ambas descargas. Sin embargo presentan ciertas discrepancias en el valor cerca del borde, este comportamiento no es inesperado ya que la modelización de esta región del plasma es la más complicada de realizar. No se dispone de perfiles experimentales de la temperatura de iones por este motivo no es posible realizar la comparación de los perfiles obtenidos.

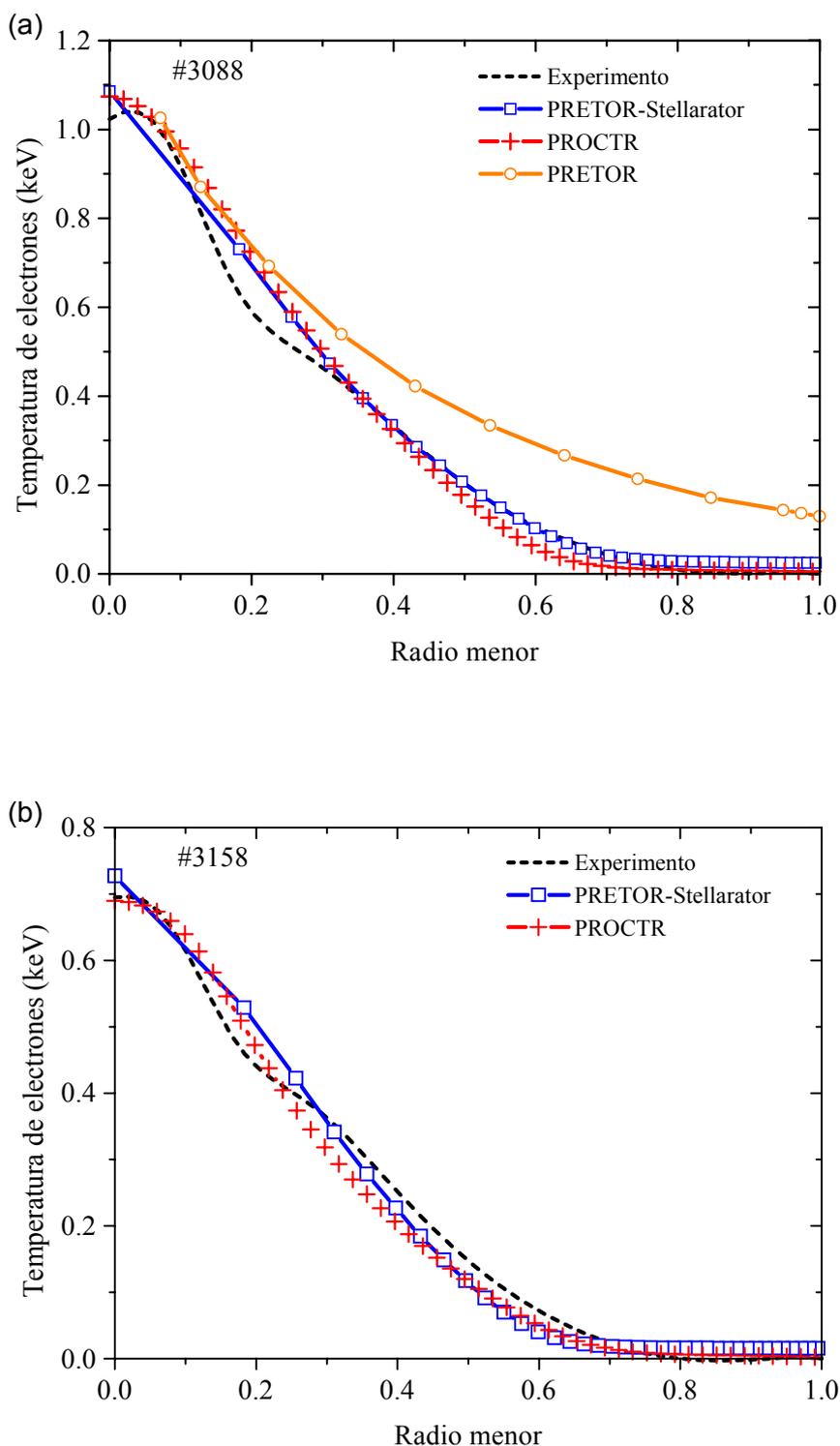


Figura 7.4 Perfiles de temperatura de electrones de los pulsos #3088 (a) y #3158 (b) del TJ-II. Se comparan los resultados obtenidos de la simulación con PRETOR-Stellarator con los perfiles experimentales y con los obtenidos con el código PROCTR. El perfil obtenido con la versión anterior de PRETOR se dibuja para la descarga #3088.

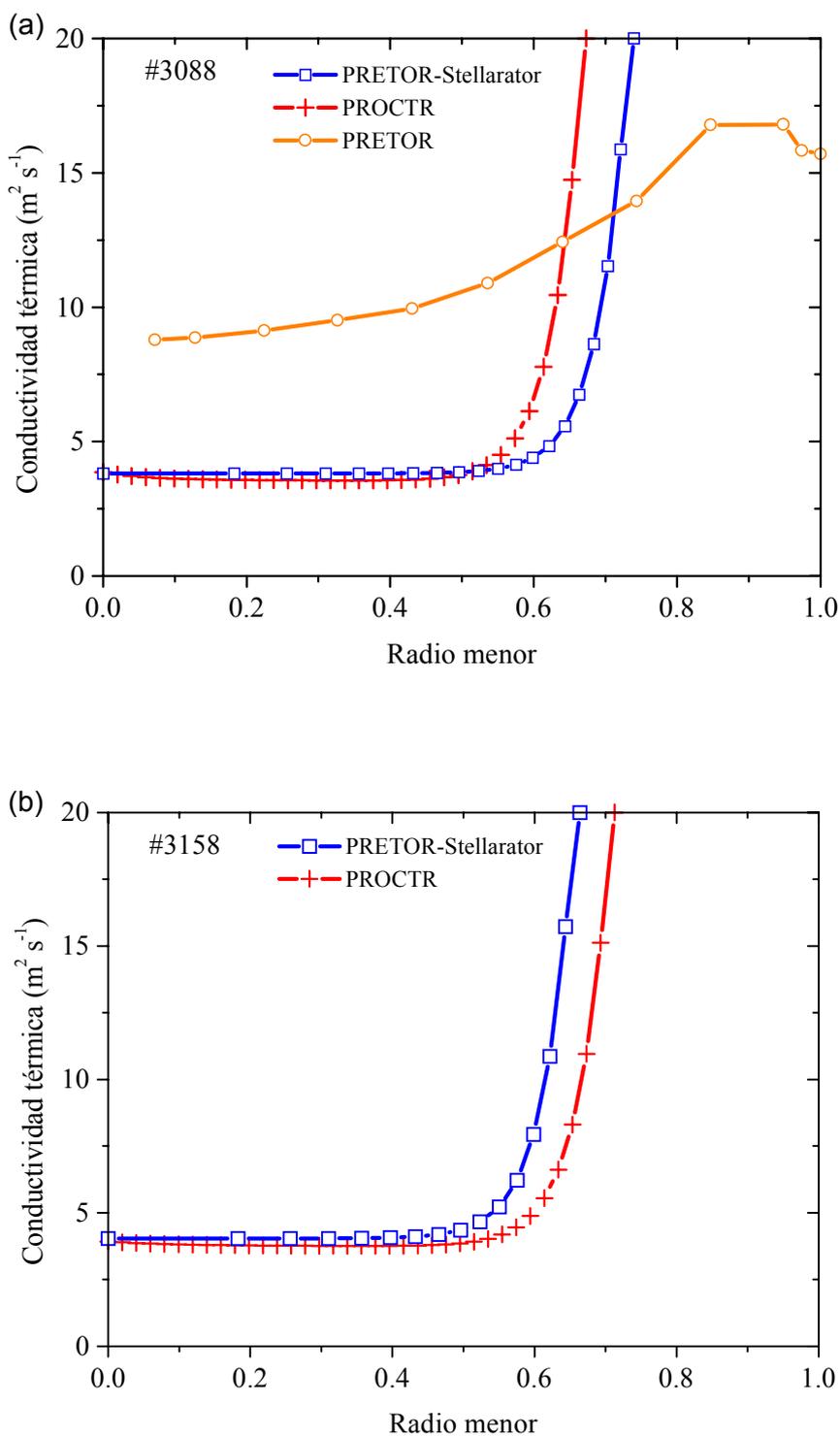


Figura 7.5 Perfiles de conductividad térmica de los electrones utilizados en la simulación de la temperatura de las descargas #3088 (a) y #3158 (b). Se comparan los perfiles de PRETOR-Stellarator y los de PROCTR. El perfil obtenido con la versión para tokamak de PRETOR se dibuja para la descarga #3088.

Los perfiles de conductividad utilizados para la simulación de la temperatura se representan en la figura 7.5. El valor de la conductividad es uniforme en gran parte del plasma con unos valores de $3.8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la descarga #3088 y $4.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la #3158. Sin embargo, a partir de un radio menor normalizado $\rho = 0.6$ el valor de la conductividad empieza a crecer de forma rápida hasta alcanzar valores muy elevados que superan los $100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en el borde. Estos valores tan altos pueden no corresponder con los valores reales de la conductividad sino que son los necesarios para tener en cuenta las pérdidas de energía producidos por otros mecanismos. El rizado magnético crece fuertemente a lo largo del radio menor, esto puede causar un incremento de las pérdidas por convección en el borde del plasma aunque no hay pruebas experimentales concluyentes. Con esta conductividad se reproduce la ancha zona a partir de $\rho = 0.8$ con un valor muy bajo, $\sim 10 \text{ eV}$, de la temperatura.

Además del perfil de temperatura se han analizado otras magnitudes significativas de un plasma termonuclear como la potencia radiada y el contenido de energía. Mediciones de la potencia radiada indican que en las campañas recientes la potencia perdida por radiación supone entre un 10 y un 20 % de la potencia absorbida. En la tabla 7.6 se muestran los valores medidos de la potencia radiada junto con los valores obtenidos de la simulación donde se comprueba la bondad de la simulación, con errores en torno al 7-8 %.

| Potencia | #3088 | #3158 |
|-------------------------------|--------------|--------------|
| Potencia radiada experimental | 57 kW | 64 kW |
| Potencia radiada simulada | 61 kW | 59 kW |
| Error | 7 % | 8 % |

Tabla 7.6 Potencia radiada de las descargas #3088 y #3158. Se comparan los valores experimentales con los valores simulados.

El contenido de energía del plasma es otra de las magnitudes a tener en cuenta. Al no disponer de valores del perfil de temperatura se hace difícil comparar la contribución del contenido de energía de los iones y la energía total del plasma, por este motivo en este caso se compara sólo la contribución de los electrones a la energía del plasma.

Los valores simulados obtenidos con PRETOR se comparan con los valores calculados a partir de los perfiles experimentales de la temperatura y de la densidad. Para la descarga #3088 el valor obtenido de PRETOR es de 0.37 kJ mientras que el valor calculado es de 0.35 kJ. Para la descarga #3158 el valor simulado es 0.24 kJ y el valor calculado a partir de los perfiles experimentales es de 0.30 kJ. La energía total almacenada medida está por encima del valor calculado a partir de los perfiles experimentales. Así la energía medida en la descarga #3088 es de 1.0 kJ pero la calculada es de 0.7 kJ, para la descarga #3158 estos valores son de 0.9 kJ para la experimental y de 0.65 kJ para la calculada. Estas discrepancias se deben a contribuciones de una función de distribución de velocidad no maxwelliana de los electrones.

7.2.4 Comparación entre PRETOR-Stellarator y PROCTR

Las mismas descargas analizadas con PRETOR-Stellarator y cuyos resultados se han presentado en los apartados anteriores fueron simuladas mediante la utilización del código PROCTR [FDF00] en la Asociación EURATOM-CIEMAT para la fusión.

Los perfiles de temperatura de PROCTR se muestran junto con los simulados con PRETOR-Stellarator en la figura 7.4. Se observa que ambos códigos reproducen de forma muy parecida el perfil experimental. Las mayores diferencias se presentan en el borde del plasma que, como ya se ha comentado anteriormente, es la región más difícil de simular. También hay ciertas diferencias en la forma del perfil alrededor del eje, con unos perfiles más picados en PRETOR que PROCTR, este comportamiento se aprecia más claramente en la descarga #3158. Estas diferencias se deben a que en PRETOR se considera la configuración con un volumen constante entre dos superficies magnéticas consecutivas, de esta forma las superficies más internas están más separadas que las externas.

En cuanto a los perfiles de conductividad térmica (figura 7.5) también se observa que ambos códigos utilizan unos perfiles muy similares con un valor prácticamente uniforme en una amplia región del plasma, y en torno a la posición $\rho = 0.6$ la conductividad crece rápidamente conforme se acerca a posiciones más exteriores del plasma. La posición exacta donde empieza al fuerte subida de la conductividad varía ligeramente de un código a otro. Estas diferencias se manifiestan en la extensión de la zona exterior del plasma con el valor muy bajo de la temperatura. El valor de la conductividad en el eje es prácticamente el mismo en PROCTR y en PRETOR-Stellarator, con una ligera diferencia inferior al 3% (tabla 7.7).

| $\chi_e(0)$ | #3088 | #3158 |
|-------------|-------|-------|
| PRETOR | 3.81 | 4.03 |
| PROCTR | 3.87 | 3.92 |
| Diferencia | 1.6 % | 2.8 % |

Tabla 7.7 Valores de la conductividad térmica de los electrones en el eje del plasma. Se comparan los valores empleados en PRETOR-Stellarator y en PROCTR.

7.2.5 Comparación entre PRETOR-Stellarator y PRETOR V2.2

La descarga #3088 también ha sido simulada con la antigua versión de PRETOR. Al igual que se observa en la simulación de la descarga #955, el perfil de temperatura de los electrones no puede ser correctamente reproducido, especialmente en el borde, además en esta zona la conductividad térmica es inferior a la obtenida usando PRETOR-Stellarator y PROCTR. Este comportamiento muestra las dificultades del modelo RLW de simular el plasma de stellarators pequeños y medianos

La difusividad térmica en el centro del plasma obtenida con esta versión de PRETOR es un factor 2 más alta que la obtenida con PRETOR-Stellarator y con PROCTR. Esta diferencia se atribuye al hecho de no haber considerado la geometría real del plasma.

7.2.6 Comparación con la descarga #955

En el tiempo transcurrido entre la descarga #955 y #3088 se han mejorado ciertos sistemas del TJ-II, por ejemplo, se introduce el calentamiento de la cámara de vacío para reducir la concentración de impurezas dentro del plasma. Además se han implementado varios sistemas de diagnósticos que permiten obtener mayor número de señales experimentales de la evolución del plasma.

La diferencia más notable que se observa entre estas descargas es la cantidad de potencia que se escapa del plasma por radiación. En los primeros plasmas el valor se situaba en torno al 75% de la potencia total depositada por ECRH, mientras que en estas últimas descargas estudiadas el valor de la potencia es inferior al 20 % de la potencia adicional. Con lo que el confinamiento del plasma ha mejorado sustancialmente. Esta diferencia de propiedades ha sido reproducida satisfactoriamente con PRETOR-Stellarator (Tabla 7.8).

| <i>Potencia</i> | <i>#955</i> | <i>#3088</i> | <i>#3158</i> |
|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Potencia adicional | 250 kW | 500 kW | 300 kW |
| Potencia radiada | 182 kW | 61 kW | 59 kW |
| Pot. radiada / Pot. adicional | 73 % | 12 % | 20 % |

Tabla 7.8 Balance de potencia de las descargas #955, #3088 y #3158.

Otra diferencia entre estas descargas es el perfil de deposición de potencia ECRH, mientras en las descargas #3088 y #3158 esta deposición está muy localizada en una región muy pequeña (de unos 3-4 cm) alrededor del eje del plasma, en la descarga #955 la deposición tiene un perfil mucho más amplio, se supone que la deposición sigue una gaussiana cuya anchura abarca un 60% del radio del plasma (figura 7.6).

7.2.7 Resumen

El perfil de la temperatura de los electrones de las descargas #3088 y #3158 se reproducen correctamente mediante la aplicación del código PRETOR-Stellarator. Para ello se ha escogido un modelo experimental con una dependencia global con la densidad y la temperatura del plasma dado por la ley de escala LHD para el tiempo de confinamiento.

Estos mismos perfiles se comparan con los proporcionados de la simulación mediante el código PROCTR, se observa que ambos resultados son compatibles, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a las medidas experimentales y a las propias de la simulación.

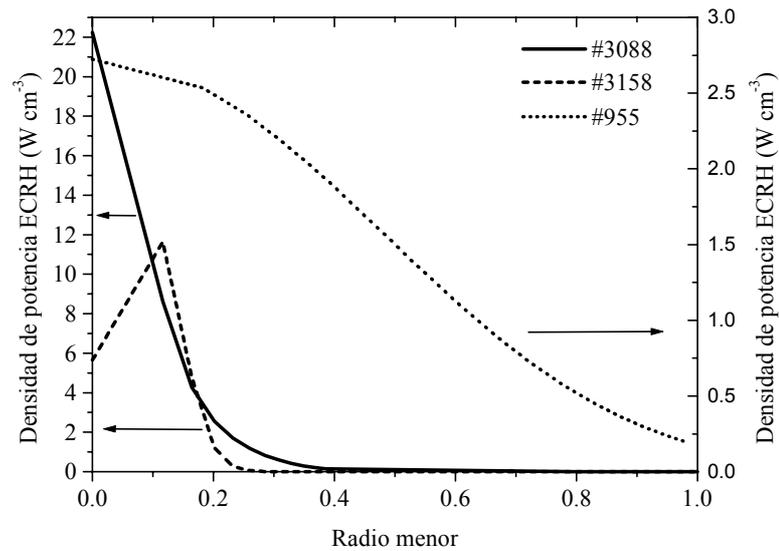


Figura 7.6 Comparación del perfil de la deposición de potencia adicional ECRH en las descargas #955, #3088 y #3158 del TJ-II.

Los valores de la potencia radiada y de la energía almacenada en el plasma obtenidos de la simulación con PRETOR-Stellarator también se comparan con los valores experimentales. Se observa que los errores cometidos en la simulación son modestos, inferiores al 10% para la potencia radiada y del 6% para la energía almacenada en la descarga #3088 (aunque en la descarga #3158 llega al 20%).

No se disponen de medidas para el perfil de la temperatura de los iones, por este motivo no es posible realizar comparación entre la simulación y el experimento.

7.3 Conclusiones

Se analizan tres descargas distintas del heliac flexible TJ-II, la primera de ellas (la número 955) corresponde a la primera campaña experimental del TJ-II mientras que las otras dos (#3088 y #3158) son mucho más recientes y presentan algunas propiedades muy diferentes como la potencia radiada y la deposición de potencia adicional.

Los perfiles de temperatura de las tres descargas se simulan mediante PRETOR-Stellarator. En todos los casos se reproducen correctamente los perfiles experimentales cuando se escogen los parámetros adecuados del modelo de la conductividad.

Las mismas descargas se han simulado mediante el código PROCTR, habitualmente utilizado en la simulación de stellarators. Los resultados obtenidos son compatibles con aquellos calculados con PRETOR-Stellarator, teniendo en cuenta las incertidumbres existentes en los datos experimentales.

Los valores experimentales de la potencia radiada y de la energía almacenada en el plasma también son correctamente predichos mediante la simulación de PRETOR-Stellarator.

La comparación entre las simulaciones realizadas con la versión inicial de PRETOR para tokamaks, con los resultados experimentales y con las simulaciones de PROCTR y PRETOR-Stellarator muestra que los efectos de la geometría, incluso considerándolos de forma aproximada, pueden tener un papel importante en la simulación del transporte. Además se observa las dificultades del modelo de Rebut-Lallia-Watkins de reproducir los perfiles de temperatura de stellarators.

Los resultados obtenidos demuestran que las modificaciones realizadas sobre la versión anterior de PRETOR para tokamaks hasta llegar a la versión PRETOR-Stellarator han conducido a un código capaz de simular correctamente descargas de dispositivos tipo stellarator. Esta versión podrá ser utilizada para el análisis de descargas del TJ-II o de otros dispositivos.

Hay que destacar que PRETOR es un código utilizado por la comunidad internacional de fusión para el estudio de tokamaks, pero su modificación y aplicación a stellarators constituye una aportación inédita en el ámbito internacional. Además la aplicación de PRETOR-Stellarator al estudio del transporte del TJ-II constituye también un aspecto novedoso a nivel nacional cuya importancia radica en que PRETOR es un código muy versátil debido a la posibilidad de modificarlo y a la experiencia en su uso que se tiene en este departamento. Además el disponer del código PRETOR-Stellarator junto con el código PROCTR disponible en el CIEMAT permitirá diversificar los estudios de transporte gracias a la colaboración existente entre el Departament de Física i Enginyeria Nuclear de la UPC y el Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT.