

Capítulo 5

Estudios de transporte

5.- Estudios de transporte

5.1.- Validación con descargas de TJ-II

Como se ha visto en el capítulo 2, PRETOR-Stellarator es un código de transporte de partículas y energía capaz de simular descargas de stellarators. Al ser un código desarrollado recientemente es necesario validarlo con datos experimentales para comprobar su buen funcionamiento con diversas descargas con características diferentes entre ellas [Fon 01b].

5.1.1.- Datos experimentales

Para realizar su validación se escogieron diferentes descargas de la campaña experimental del heliac flexible TJ-II que empezó en febrero de 2001. Se seleccionaron descargas representativas y para ello se utilizaron las herramientas de participación remota implementadas en el *Departament de Física i Enginyeria Nuclear* y explicadas en el capítulo 4 de la presente tesis. Primero de todo se hizo una búsqueda de disparos a través de la pizarra electrónica. Una vez realizada una primera selección, se pasó a visualizar las características más importantes para el estudio del transporte, como son la densidad y la temperatura, eligiendo descargas que tuviesen características diferentes. Con las descargas elegidas se obtuvo de la base de datos de TJ-II la temperatura electrónica medida por los radiómetros de frecuencia electrón-ciclotrón (ECE) en diferentes posiciones radiales del plasma y la densidad de línea de cada descarga. Con estos datos se deduce un perfil experimental de la temperatura.

Parámetro	#5005	#5042	#5109	#5340	#5488	#5518	#5529
Te(0) (keV)	0.97	0.50	1.01	0.83	1.13	1.3	1.1
$\langle n_e \rangle$ (10^{19} m^{-3})	0.82	0.91	0.56	0.50	0.54	0.5	0.54
W(kJ)	1.2	0.87	0.60	0.65	0.60	0.51	0.48
Gas	H	H	H	He	H	He	He

Tabla 5.1. Resumen de los principales parámetros de las descargas utilizadas para la validación de PRETOR-Stellarator.

Como se puede observar en la tabla anterior entre las descargas escogidas hay algunas de hidrógeno y otras de helio. La temperatura central del plasma varía entre 0.5 keV y 1.3 keV y la densidad de línea está comprendida entre $0.5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ y $0.91 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. La energía almacenada en el plasma va desde un mínimo de 0.48 kJ hasta un máximo de 1.2 kJ.

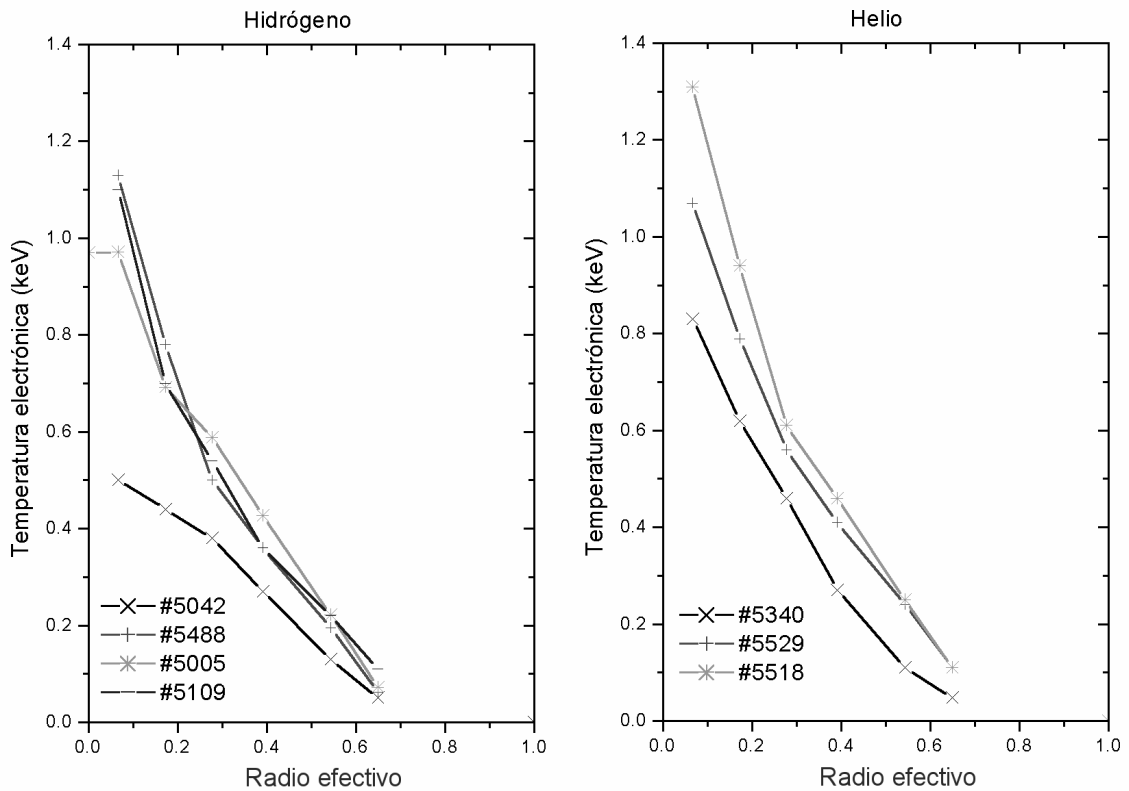


Fig. 5.1. Temperatura electrónica de las descargas utilizadas para la validación de PRETOR-Stellarator. Los puntos marcados son los puntos donde se tienen datos experimentales del ECE.

5.1.2.- Análisis del transporte

Una vez escogidas las descargas se reprodujo el perfil de temperatura electrónica utilizando el modelo empírico LHD para la conductividad térmica explicado en el apartado 2.4.2. Para la correcta simulación de los perfiles de temperatura electrónica se han de ajustar los tres parámetros con que cuenta este modelo.

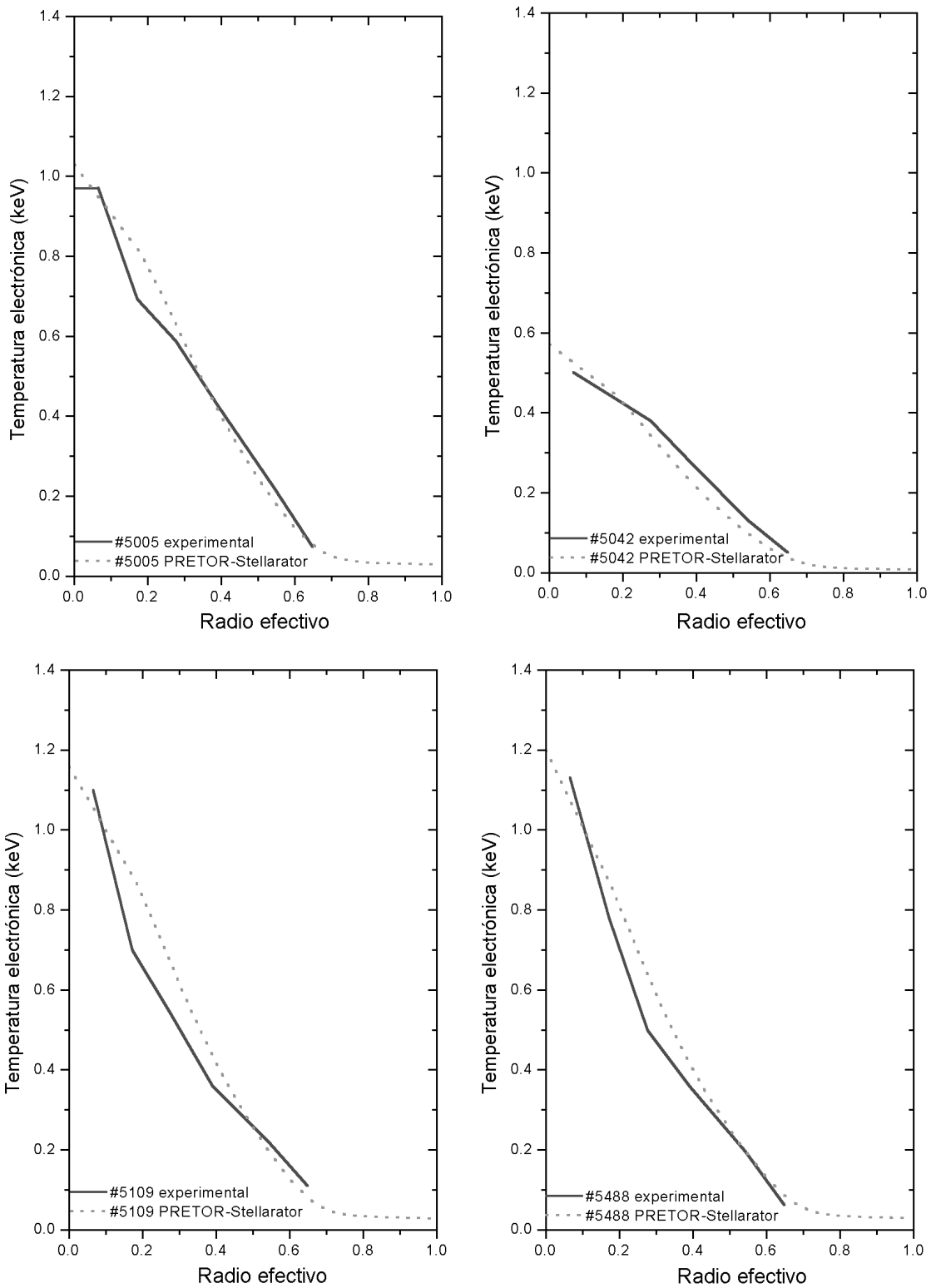


Fig. 5.2. Perfiles experimentales de la temperatura electrónica de las descargas con hidrógeno y perfiles simulados con PRETOR-Stellarator.

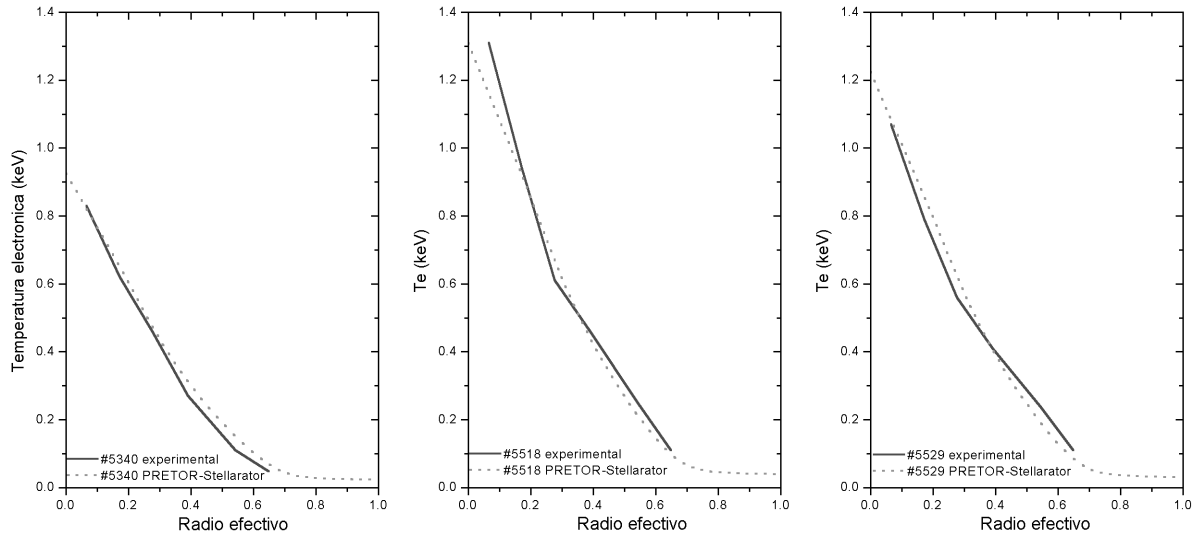


Fig. 5.3. Perfiles experimentales de la temperatura electrónica junto con los simulados con PRETOR-Stellarator para las descargas de helio.

Para cuantificar el grado de ajuste entre el perfil experimental y el simulado se ha calculado la desviación cuadrática media entre los dos perfiles. Para ello se utiliza la siguiente fórmula [Fon 01]:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_i (Te_i^{sim} - Te_i^{exp})^2}}{\sqrt{\sum_i (Te_i^{exp})^2}} \tag{5.1}$$

Donde el sumatorio se extiende en todos los puntos donde se tienen datos experimentales y Te es el valor de la temperatura de los electrones en esos puntos, simulada o experimental. A partir de esta fórmula se obtiene los siguientes valores para la desviación cuadrática media:

Descarga	#5005	#5042	#5109	#5340	#5488	#5518	#5529
Desviación	0.11	0.14	0.19	0.12	0.14	0.10	0.09

Tabla 5.2. Desviación cuadrática media del perfil de la temperatura electrónica de las descargas analizadas con PRETOR-Stellarator.

Como puede comprobarse en la tabla 5.2 el error cometido en el perfil de la temperatura electrónica es razonablemente bajo teniendo en cuenta las incertidumbres en los datos experimentales, normalmente por debajo del 15%, con una sola excepción en la que se acerca al 20%, estas discrepancias podrían ser debidas a los pocos puntos experimentales con los que

se obtiene el perfil. Tampoco se observan diferencias significativas entre las descargas de hidrógeno y las de helio.

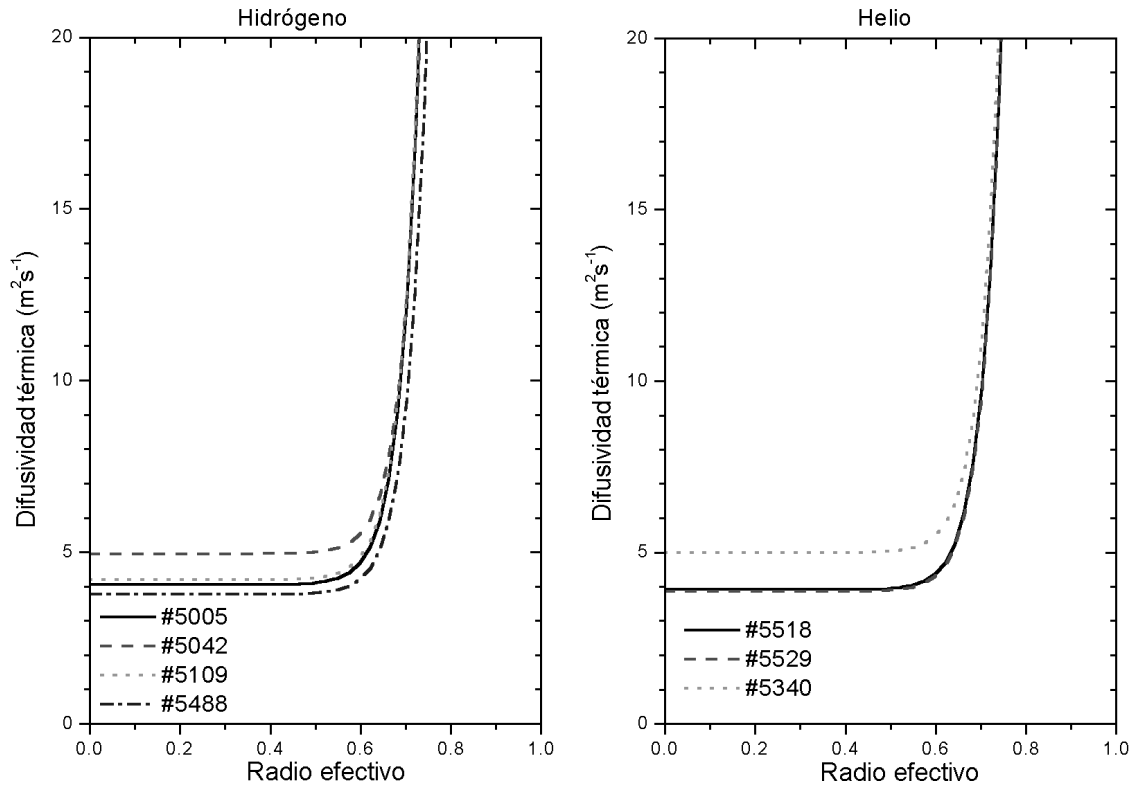


Fig. 5.4. Valores de las difusividades térmicas de los electrones para las descargas simuladas. A la izquierda las descargas con hidrógeno y a la derecha con helio.

En la figura 5.4 se muestran los resultados de la difusividad térmica de los electrones obtenida con PRETOR-Stellarator. Se puede observar fácilmente que no hay diferencias entre las descargas de helio y las de hidrógeno. Tampoco hay muchas diferencias en cuanto al valor central de la difusividad térmica, todas varían entre $3.8 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $5.0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Esta pequeña discrepancia es todavía menor si no se tienen en cuenta las dos descargas con el valor central de $5.0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, pues el en el resto de descargas el valor central está comprendido entre $3.8 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $4.2 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Otro estudio realizado para validar el código ha sido la comparación del contenido de energía de los electrones. Sólo se ha comparado la energía almacenada en los electrones porque no se tienen los valores de densidad de los iones ni perfil de temperatura iónica, con lo que una comparación de toda la energía almacenada en el plasma sería irrelevante al no tener datos experimentales con los que comparar la temperatura iónica.

Para obtener los valores de la energía almacenada en los electrones se ha multiplicado el valor de la temperatura y densidad experimentales. Para el perfil radial de densidad se ha escogido la siguiente función [Cas 98]:

$$n(\rho) = n_0 (1 - \rho^\alpha)^\beta \quad (5.2)$$

Donde n_0 , α y β son parámetros a ajustar. El valor de n_0 se escoge para que el valor de la densidad de línea sea igual al valor experimental, mientras que los valores de α y β sirven para dar la forma al perfil, aproximadamente plano en el centro y con una brusca caída en el borde. Se ha escogido esta forma pues es el perfil típico de densidad para plasmas de TJ-II con similares condiciones de calentamiento, este resultado ha sido obtenido a partir de la densidad medida por el scattering Thompson en descargas equivalentes.

Se han comparado los datos experimentales obtenidos de la manera explicada anteriormente con los datos resultantes de la simulación de PRETOR-Stellarator. Los valores resultantes del código de cálculo son siempre menores que los experimentales. Esta discrepancia puede ser por los errores en el perfil experimental de la densidad electrónica, que a pesar de ser bastante similar a la real siempre es un ajuste de una función. En la siguiente tabla se resume los valores de la energía almacenada en el plasma, tanto experimental como simulada, junto con el valor del error.

Descarga	#5005	#5042	#5109	#5340	#5488	#5518	#5529
W_e (exp) (kJ)	0.45	0.33	0.30	0.23	0.27	0.32	0.31
W_e (sim) (kJ)	0.37	0.26	0.30	0.19	0.27	0.25	0.24
Error (%)	17.2	20.7	0.0	18.6	0.0	23.1	22.7

Tabla 5.3. Comparación entre los valores experimentales y simulados de la energía almacenada en los electrones del plasma con la indicación del error.

5.1.3.- Discusión

Con las simulaciones realizadas se ha utilizado el código en situaciones diversas, consiguiendo en todas las descargas un buen acuerdo entre los valores de temperatura electrónica experimentales y los simulados. También son muy similares los valores de la difusividad térmica de los electrones calculada con PRETOR-Stellarator, no apreciándose grandes diferencias entre

las descargas realizadas con hidrógeno y helio. En el caso de la simulación de la energía almacenada en los electrones las discrepancias son mayores, esto es debido a que no se conoce bien el perfil de la densidad de los electrones, con lo que los valores experimentales de la energía no son muy exactos dando lugar a mayores errores.

5.2.- Modificaciones del código

Se ha visto que el código PRETOR-Stellarator es válido para simular el transporte de energía y partículas en dispositivos de fusión tipo stellarator. Pero si se quieren simular fenómenos que ocurren en el centro del plasma la precisión del código en esta zona no es la óptima.

Esta limitación es debida a que las superficies magnéticas vienen introducidas a partir del código VMEC [Hir 86] y este código calcula las superficies a volumen constante, con lo que la distancia entre dos superficies interiores será mayor que la existente entre dos superficies exteriores. En el caso de la principal configuración magnética empleada en los cálculos de esta tesis, la primera superficie se encuentra por encima de 0.1 de radio efectivo. Esto hace que si se quiere simular un fenómeno muy localizado en el centro del plasma no se obtengan los resultados esperados.

Para obtener mayor precisión en el centro del plasma se ha introducido en el código de cálculo una nueva función. Ésta después de haber leído las superficies magnéticas desde VMEC subdivide la primera de las superficies en otras (normalmente 4) de manera de obtener una mayor densidad de superficies en el centro del plasma. También se ha tenido que variar el cálculo de algunas funciones geométricas para que incluyan las nuevas superficies introducidas.

Con estas últimas modificaciones realizadas se han podido realizar estudios que necesitan una modelización más detallada del centro del plasma.

5.2.1.- Variación de la conductividad térmica en función del perfil de deposición de potencia

Con el código adaptado para poder estudiar los fenómenos que ocurren en el centro del plasma se ha hecho un primer estudio para validar el cambio. Éste ha consistido en estudiar el valor de la difusividad térmica de los electrones en el centro del plasma en función del perfil de deposición de potencia.

El perfil de deposición de potencia es la forma con la que el plasma absorbe las microondas utilizadas para calentarlo. Variando éste ha de variar la difusividad térmica, pues un perfil más estrecho y centrado, a igualdad de potencia total, hará que la densidad de potencia sea mayor en el centro del plasma, con lo que la difusividad térmica aumentará para mantener la misma temperatura central. También si el perfil no está centrado la máxima densidad de potencia no estará en el centro del plasma, con lo que el resultado de la difusividad térmica deberá ser diferente a un caso con el perfil de densidad de potencia centrado.

Para el estudio se ha escogido la descarga #3088. Ésta es una descarga calentada por ECRH a 500 kW, el gas de trabajo es hidrógeno con una densidad central de $0.9 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. En las simulaciones se ha variado el perfil de deposición de potencia para comprobar cómo afecta a la conductividad térmica de los electrones. El perfil de deposición de potencia se toma con forma gaussiana [Fon 01]:

$$p_{RF}(\rho) \propto P_{RF}^{TOT} \exp \left[- \left(\frac{\rho - \rho_0}{\Delta\rho} \right)^2 \right] \quad (5.3)$$

Donde $p_{RF}(\rho)$ es la densidad de potencia; P_{RF}^{TOT} es la potencia total inyectada por radiofrecuencia; ρ_0 es la posición central del perfil de potencia; ρ es el radio efectivo; y $\Delta\rho$ es la anchura del perfil.

En los estudios se han tomado tres valores diferentes de la anchura del perfil (15%, 20% y 25%) y tres posiciones diferentes del punto central de la deposición de potencia (0.00, 0.05, 0.10 de radio efectivo). El valor experimental de $\Delta\rho=0.2$ y centrado en el origen, ha sido obtenido mediante experimentos de modulación de potencia. Los resultados de las simulaciones están resumidos en las tablas 5.4 y 5.5.

		$\Delta\rho$		
		0.15	0.20	0.25
ρ_0	0.00	7.03	4.85	3.41
	0.05	5.51	3.88	2.92
	0.10	3.81	2.88	2.35

Tabla 5.4. Variación de la difusividad térmica central de los electrones (en m^2s^{-1}) en función de la anchura y posición del perfil de deposición de potencia.

		$\Delta\rho$		
		0.15	0.20	0.25
ρ_0	0.00	40.9	23.6	15.3
	0.05	23.8	15.6	10.9
	0.10	12.4	9.7	7.5

Tabla 5.5. Variación de la densidad central de potencial (en MWm^{-3}) en función de la anchura y posición del perfil de deposición de potencia.

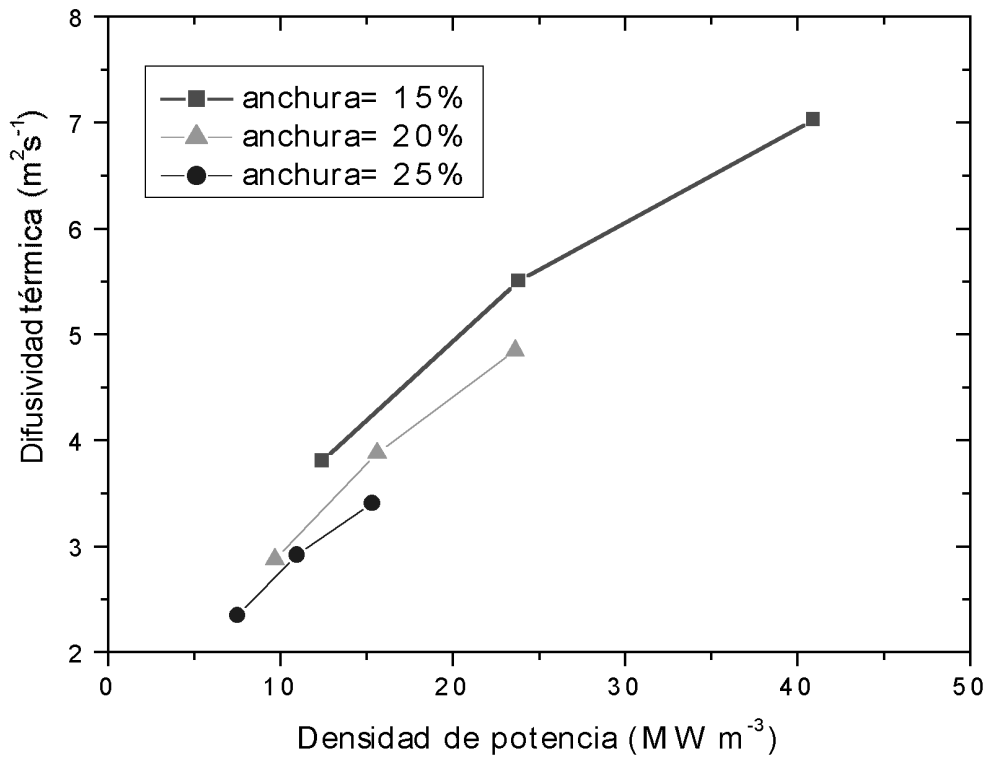


Fig. 5.5. Correlación entre la densidad de potencia y el valor de la difusividad térmica de los electrones en el centro plasma para los nueve casos estudiados.

En las dos tablas anteriores se puede ver que cuando crece la deposición de potencia también crece la difusividad térmica, como era de esperar para mantener la temperatura central inalterada.

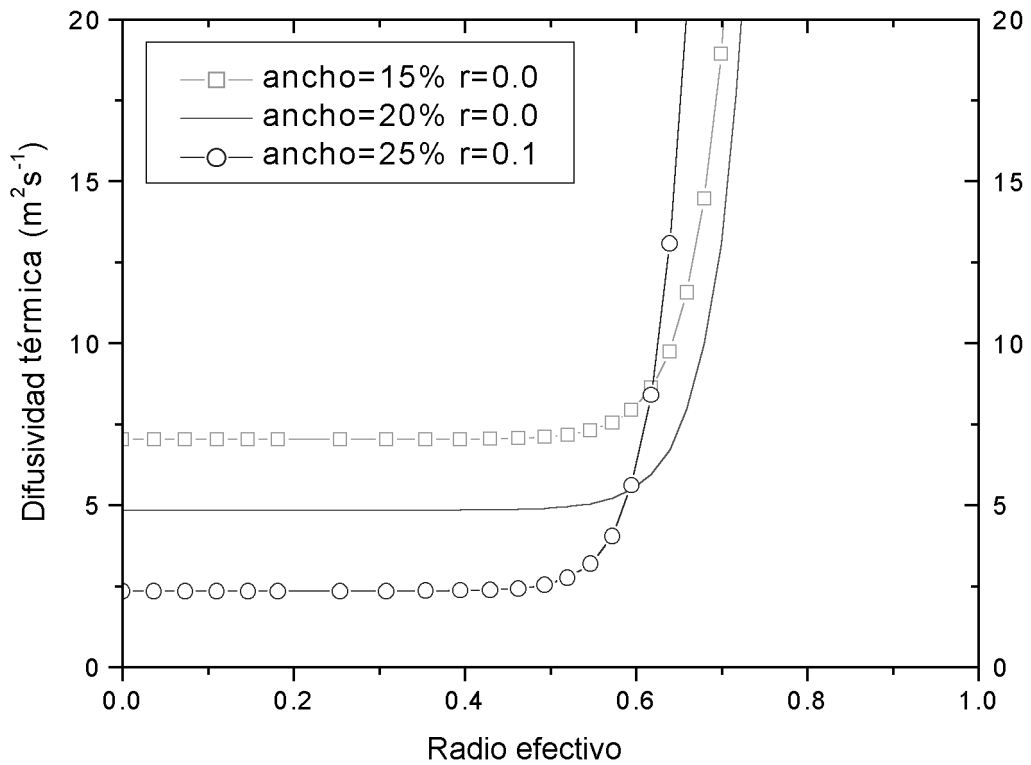


Fig. 5.6. Valores de la difusividad térmica de los electrones para el caso de referencia (ancho=20%, $r=0.0$) y los de mayor (ancho=15%, $r=0.0$) y menor (ancho=25%, $r=0.1$) densidad de potencia en el centro.

La incertidumbre en los valores experimentales de la deposición de potencia implican un error en los resultados de la conductividad térmica. En este estudio la densidad de potencia varía entre los valores de 7.5 MW m^{-3} y 40.9 MW m^{-3} con un valor de referencia de 23.6 MW m^{-3} (el caso experimental), que implica un variación del 73%. Por otro lado la máxima variación de la difusividad térmica es de 45%, esto indica que un error en la estimación de la deposición de potencia influye de manera menos que lineal en el resultado de la difusividad térmica de los electrones.

5.3.- Modos de confinamiento mejorado: barrido en densidad

Como se ha dicho anteriormente en el capítulo 2, el estudio del transporte es un punto importante en la investigación sobre la fusión nuclear para conseguir tiempos de confinamientos mayores y de este modo aumentar las probabilidades de reacciones de fusión.

En la actualidad se investigan los modos de confinamiento mejorado, en los que las características de la máquina no cambian pero por el tipo de calentamiento adicional y condiciones de densidad y otros parámetros de la descarga hace que el transporte se reduzca notablemente, alcanzando mayores temperaturas de las esperadas con el mismo calentamiento. Un típico fenómeno de confinamiento mejorado es el modo H conseguido en tokamaks y stellarators [Wag 94].

En el Helioetrón/Torsatrón CHS se han observado barreras internas de transporte, que hacen aumentar la temperatura central del plasma mediante una fuerte cizalla magnética del campo eléctrico radial producido por calentamiento ECRH. Estas barreras de transporte se producen con las condiciones de calentamiento anteriormente citadas y se caracterizan por un perfil de la densidad de los electrones plano o ligeramente ahuecado en el centro. También resulta un perfil de la temperatura electrónica picado en el centro. [Fuj 99]

En el stellarator Wendelstein7-AS también se ha observado un fenómeno de mejora del confinamiento de los electrones, aunque en este caso se ha llamado *electron root* y no barrera de transporte. Se ha observado un perfil muy picado de los perfiles de la temperatura electrónica, que se explican por la absorción del calentamiento ECRH, también se encuentran fuertes campos eléctricos radiales positivos. [Maa 00]

En el TJ-II también ha sido observado este fenómeno. En este caso se han observado temperaturas electrónicas centrales de hasta 2 keV para un calentamiento por ECRH de 300 kW, cuando en condiciones normales la temperatura central es de entre 0.8-1.2 keV para calentamiento de 600 kW. Los plasmas con modo confinamiento mejorado presentan un perfil ahuecado de la densidad y un perfil de la temperatura electrónica muy picado. La energía

contenida en estos plasmas es ligeramente superior a la contenida en otros sin este modo de confinamiento mejorado, pero no mucho más porque el incremento de temperatura se da en un volumen pequeño del plasma. [Cas 02]

5.3.1.- Datos experimentales

Para realizar el estudio del modo de confinamiento mejorado en TJ-II se han escogido 5 descargas que constituyen un barrido en densidad. Con el mismo valor de calentamiento, gas y campos magnéticos se ha variado la densidad para comprobar su influencia en el modo de confinamiento mejorado.

Todas las descargas han sido calentadas con 300 kW de ondas electrón-ciclotrón. Los valores máximos de la densidad varían desde $0.71 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ hasta $1.10 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ pero éstos no se encuentran en el centro, resultando un perfil ahuecado [Cas 01]. Por contra la densidad media de línea es baja comparada con la densidad de un disparo de referencia de TJ-II, las densidades medias de línea están por debajo de $0.6 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, mientras que en las descargas de referencia suele estar por encima de $0.8 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Los perfiles de temperatura en esta serie de experimentos son muy picados en el centro con valores máximos de entre 0.73 keV y 1.44 keV.

En la figura 5.5 se muestran los perfiles de densidad y temperatura electrónica de estas descargas. Los perfiles han sido obtenidos a partir del *scattering* Thompson, se ha suavizado la señal bruta y solo se ha mostrado medio radio efectivo para mejor comprensión del gráfico.

En la figura se puede ver cómo todas las descargas excepto la #2559 tienen un perfil de temperatura muy picado en el centro así como en el perfil de densidad todos tienen el máximo en un valor de radio menor de aproximadamente 0.2, resultando un perfil ahuecado. Lo mismo sucede con la temperatura electrónica, que sube mucho dentro del radio menor de 0.2, excepto en la descarga #2559, en la que no se observa el fenómeno de mejora de confinamiento.

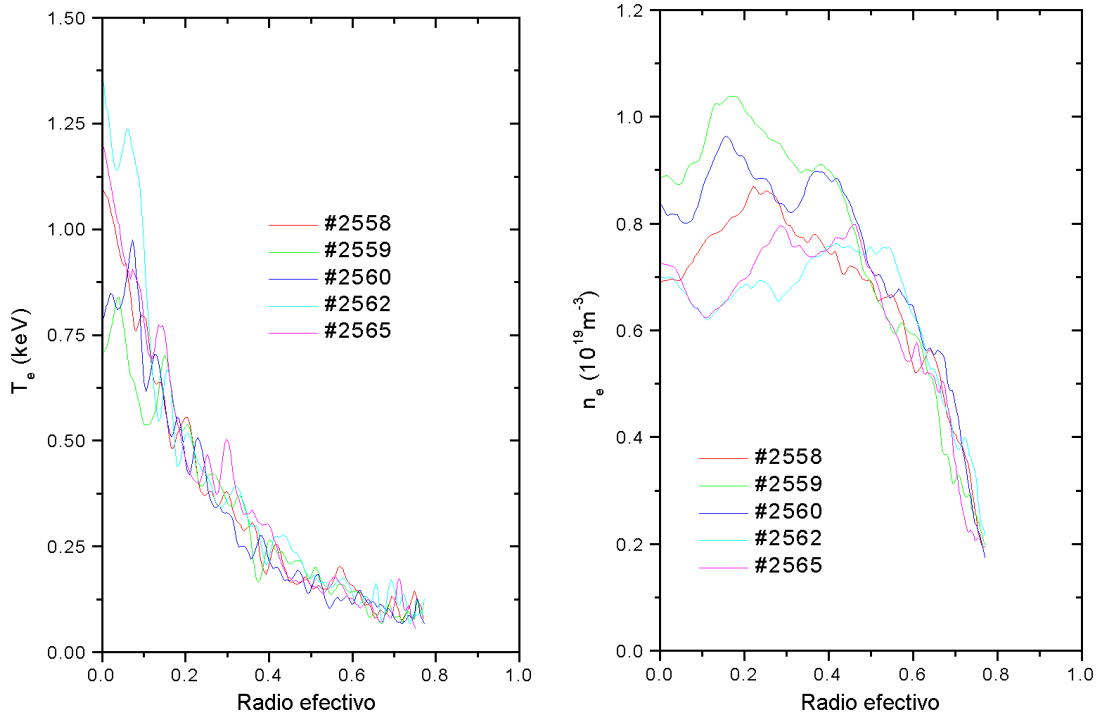


Fig. 5.5. Perfiles de temperatura (izquierda) y densidad electrónica (derecha) de las descargas utilizadas en el barrido en densidad. Los datos han sido obtenidos a partir del *scattering* Thompson.

5.3.2.- Simulaciones y análisis del transporte

Para poder realizar las simulaciones se utilizó la versión de PRETOR-Stellarator en la que se han añadido superficies magnéticas centrales pues el fenómeno a estudiar se encuentra muy en el centro y la anterior versión no tenía en este punto la precisión necesaria para realizar este estudio.

Para realizar el análisis del transporte se ha tenido que implementar una función que tenga en cuenta el nuevo perfil de la difusividad térmica de los electrones para obtener el perfil de temperatura experimental. La nueva función implementada es la siguiente [Cas 02]:

$$\chi_e(\rho) = \chi_S(\rho) \left(1 - h e^{-\left(\frac{\rho - \rho_b}{w}\right)^\alpha} \right) \quad (5.4)$$

Donde $\chi_S(\rho)$ es el valor de la difusividad térmica según el modelo empírico LHD, normalmente empleado en las simulaciones de TJ-II; h es la cantidad de reducción del transporte; ρ_b es el centro de la zona de transporte reducido; w es la anchura de la zona de transporte reducido; y α

es un exponente que sirve para variar la forma de la zona de disminución del área de transporte reducido.

La introducción de la nueva forma de la difusividad térmica se ha hecho de manera que se puedan variar los cuatro parámetros durante la simulación. Para ello se han creado nuevas variables en el código PRETOR-Stellarator con su correspondiente pantalla de diálogo para poder introducir sus valores durante la ejecución del código.

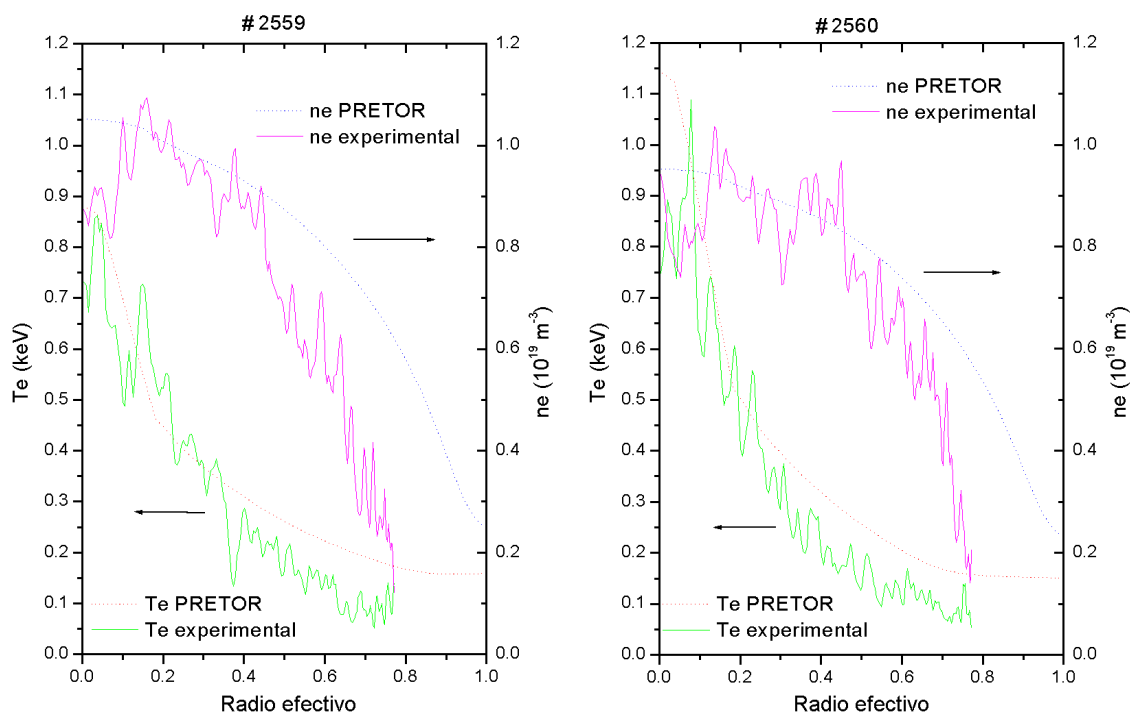


Fig. 5.8. Perfiles radiales de la temperatura y densidad electrónicas experimentales y simuladas con PRETOR-Stellarator para dos descargas de la serie del barrido en densidad.

En la figura 5.8 se muestran los perfiles de densidad y temperatura electrónica para las descargas #2559 y #2560, pertenecientes al barrido en densidad utilizado para el estudio del modo de confinamiento mejorado. En el borde no se tienen valores experimentales pero la tendencia de los perfiles ya se ve bien, y además PRETOR-Stellarator no simula bien el borde del plasma con lo que estos datos serían poco relevantes para el estudio que se está llevando a cabo con estas descargas.

El ajuste de la temperatura es muy parecido al perfil real, siguiendo bien los datos experimentales en todo el radio del dispositivo. En el caso de la densidad hay más discrepancias entre los dos

perfiles porque los modelos implementados en PRETOR-Stellarator no permiten la simulación del perfil ahuecado; por otra parte, a partir de un radio efectivo por encima de 0.5 la densidad experimental cae rápidamente mientras que la simulada con PRETOR-Stellarator tarda más en caer.

Para realizar las simulaciones con el modo de transporte mejorado se ha supuesto que la posición y anchura de la zona de transporte mejorado son iguales para todas las descargas con esta característica, como se deduce de los datos experimentales, en los que se ve que el picado de la densidad se produce en el mismo valor de radio menor. La única variación entre las descargas ha sido la de la cantidad de reducción del transporte. Las descargas en las que la temperatura central es mayor y la densidad menor son las que presentan una reducción de transporte mayor.

En la figura 5.9 se representa la difusividad térmica de los electrones para las descargas utilizadas en el estudio. En todas ellas se puede ver la influencia de la reducción del transporte en el centro del plasma. La difusividad térmica en el centro es mucho más baja en las descargas con esta característica que en la descarga que no la presenta (#2559). También se puede observar que en la zona intermedia del plasma ($0.25 < \rho < 0.5$) los valores de la difusividad térmica son mayores que los típicos para otras descargas de TJ-II. Esta diferencia de difusividades térmicas hace que el perfil de la temperatura sea muy picado en el centro, siguiendo los datos experimentales.

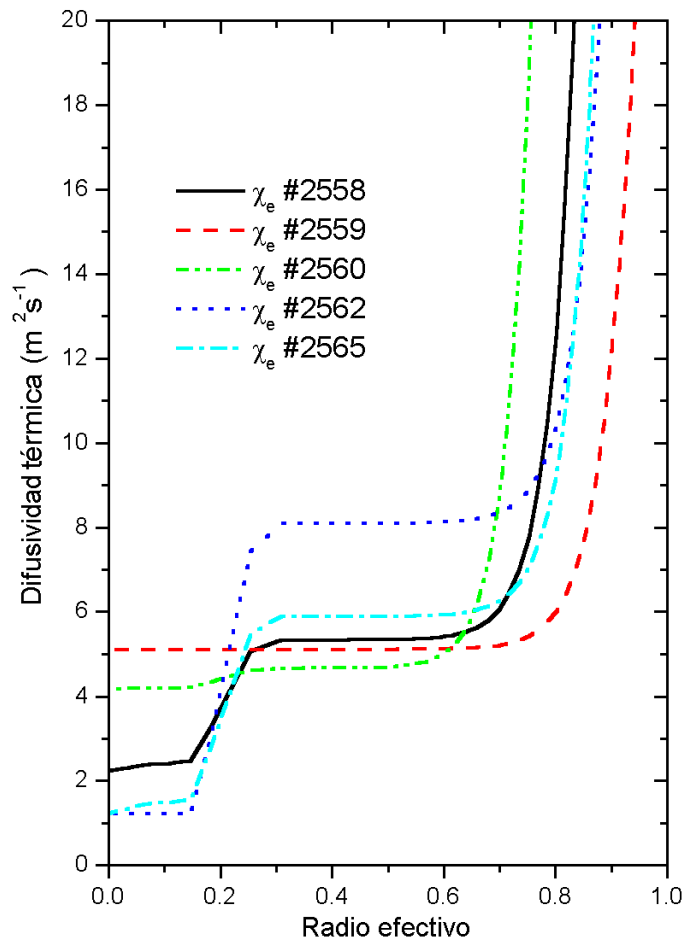


Fig. 5.9. Difusividad térmica de los electrones de las descargas utilizadas para el estudio del barrido en densidad.

5.4.- Modos de confinamiento mejorado: barrido en configuraciones

Un barrido en configuraciones de TJ-II puede ayudar a discernir la influencia de la transformada rotacional en el modo de confinamiento mejorado, ya que para cada configuración magnética la posición de las superficies y por tanto de la transformada rotacional varía.

La transformada rotacional (ι) es una medida de la relación entre el flujo poloidal y el toroidal, se define a partir del factor de seguridad q [Wes 97]:

$$\iota = \frac{2\pi}{q}; \quad \bar{\iota} = \frac{1}{q} \tag{5.5}$$

Donde q es el factor de seguridad. El factor de seguridad se define como el número de vueltas poloidales que da una línea de campo en una vuelta toroidal. Se puede aproximar por el siguiente valor [Wes 97]:

$$q = \frac{rB_t}{R_0B_p} \quad (5.6)$$

Donde r es el radio menor; R_0 el radio mayor; B_t el campo magnético toroidal; y B_p el campo magnético poloidal en la superficie de radio menor r .

Si el valor de q es racional la línea de campo se cerrará sobre sí misma después de algunas vueltas toroidales, con lo que en ese radio no habrá una superficie magnética completa sino que se formará una isla magnética.

5.4.1.- Datos experimentales

Para el estudio de la influencia de la transformada rotacional en el transporte se escogió un barrido en configuraciones de TJ-II en el que un valor racional de la transformada rotacional varía su posición en el plasma. Se han seleccionado cuatro descargas, todas ellas con calentamiento de 300 kW por ondas ciclotrón electrón y densidad y temperatura similares. La diferencia entre las descargas ha sido la configuración magnética, con lo que la posición de las islas magnéticas variaba.

Las descargas analizadas pertenecen a las configuraciones 100_40_63 (#4077), 100_38_62 (#4081), 100_36_62 (#4088) y 100_34_61 (#4093). Los números de la configuración indican las corrientes en las diferentes bobinas del stellarator (central_helicoidal_vertical). La configuración estándar es la 100_40_63, las otras se obtienen de la primera variando la corriente en las bobinas verticales y helicoidales, de esta manera se puede hacer que la racional $3/2$ esté en diferentes puntos de la configuración como puede comprobarse en la figura 5.10.

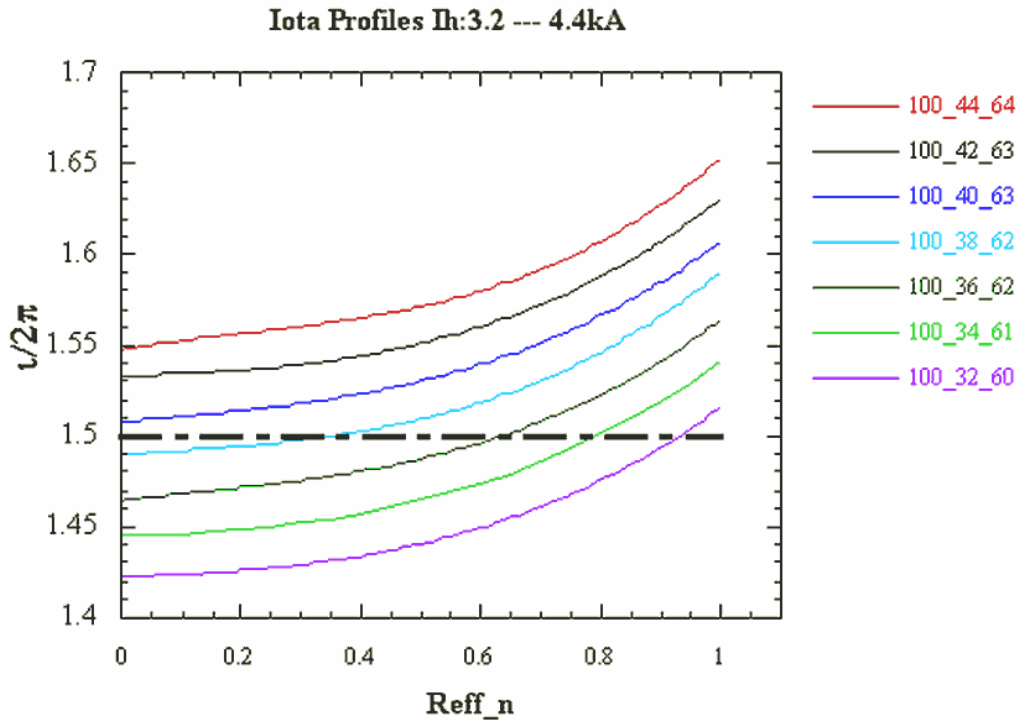


Fig. 5.10. Perfil de la transformada rotacional de TJ-II para diferentes configuraciones magnéticas. [Cas 02b]

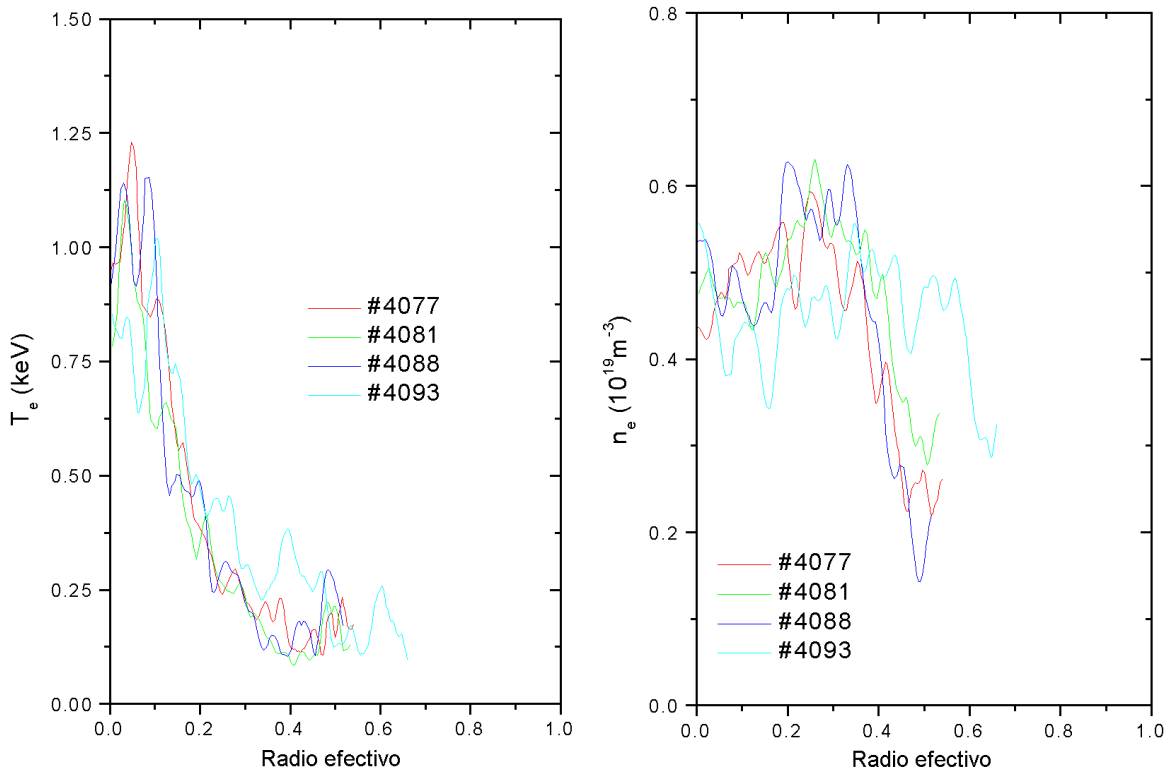


Fig. 5.11. Temperatura y densidad electrónica de las descargas utilizadas para el barrido en configuraciones. Gráficas obtenidas a partir de los datos brutos del *scattering* Thompson.

Los perfiles de densidad y temperatura de cada una de las descargas también han sido obtenidos con el diagnóstico *scattering* Thompson, igual que con las descargas utilizadas en el barrido en densidad. En este barrido las temperaturas y las densidades son muy parecidas entre las distintas descargas como puede verse en la figura 5.11.

5.4.2.- Simulaciones y análisis del transporte

Todas las descargas se han simulado con PRETOR-Stellarator. En este caso también se ha variado además de la proporción de reducción del transporte, la posición y anchura de la zona para adaptarse mejor a los perfiles experimentales de densidad y temperatura.

En estas descargas los resultados del perfil de la densidad difieren de los reales por los problemas de los modelos implementados en PRETOR-Stellarator. Por otro lado los perfiles de la temperatura son bastante similares a los experimentales.

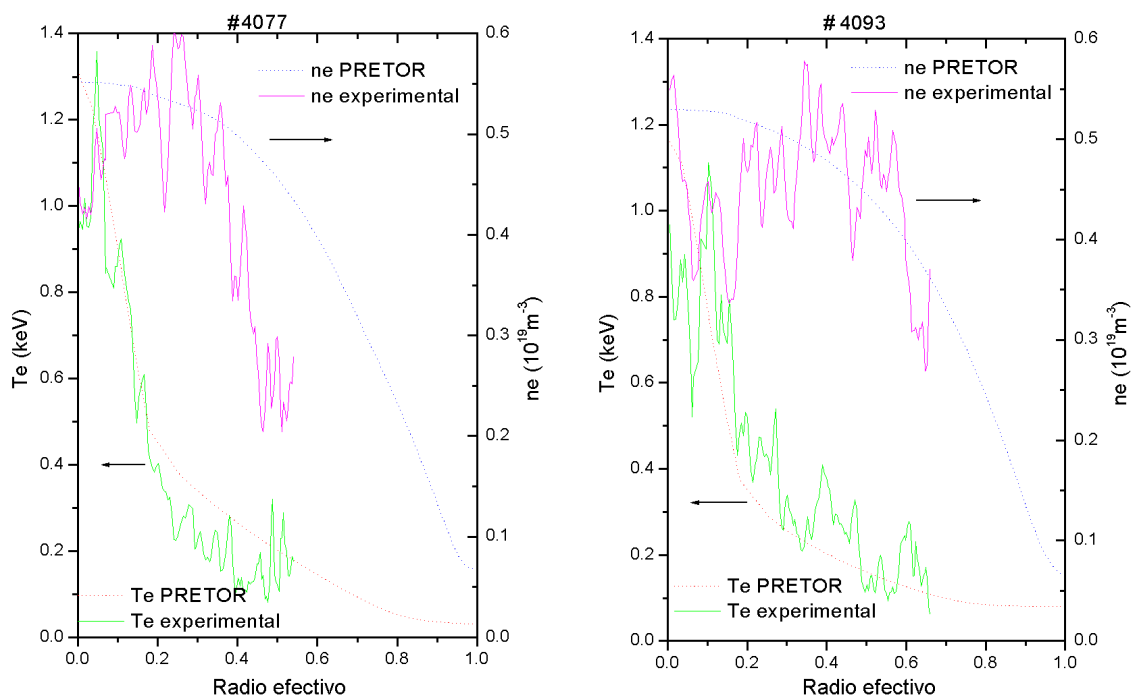


Fig. 5.12. Densidad y temperaturas experimentales y simuladas con PRETOR-Stellarator para dos de las descargas del barrido en configuraciones.

En la figura 5.12 se puede observar cómo el ajuste de la temperatura es mejor que el de los perfiles de la densidad, esto es debido a la forma ahuecada del perfil de la densidad. Se han mostrado sólo dos resultados como ejemplo, pues el resto son muy similares.

Se ha calculado el perfil de la difusividad térmica de los electrones. Los resultados están representados en la figura 5.13. Puede observarse que los valores centrales de la difusividad térmica de los electrones es muy baja en tres de las cuatro descargas, en la descarga #4093 el valor central es de casi el doble que en el resto, indicando un empeoramiento del transporte en la configuración. Esta descarga #4093 corresponde a la configuración 100_34_61, en la que la resonancia de $iota=3/2$ está en una posición más externa que en el resto de configuraciones. Este empeoramiento del confinamiento con la resonancia en el exterior puede ser debido a la interacción plasma-pared: hay mayor interacción con la resonancia en el exterior de la configuración con lo que entraría mayor número de impurezas en el plasma degradando el confinamiento [Cas 01].

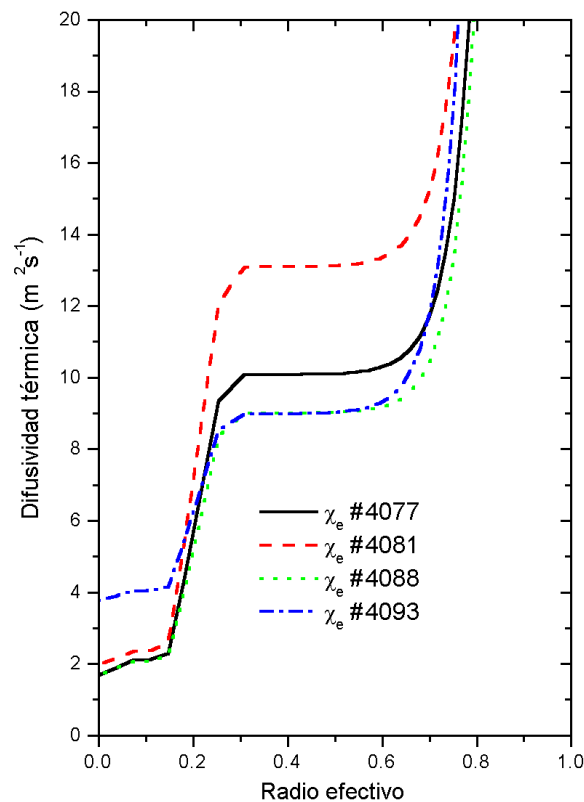


Fig. 5.13. Difusividad térmica de los electrones de las descargas del barrido en configuraciones.

5.5.- Comparación con PROCTR

En el proceso de validación de un código es enriquecedor comparar los resultados con otro código de transporte. En este caso se ha utilizado el código de cálculo PROCTR [How 90]. Éste código es un código de transporte de 1.5 dimensiones utilizado para simular plasmas de fusión en máquinas toroidales. Está indicado para el modelaje de reciclado y el control de partículas en un plasma, además puede ser utilizado de modo estacionario para estudiar el balance de energía y partículas a partir de los perfiles experimentales del plasma. Esta última característica lo hace idóneo para la comparación con PRETOR-Stellarator, pues ha sido utilizado para estos estudios. Otra de las razones para escoger PROCTR para realizar la comparación es que este código es utilizado regularmente en el Laboratorio Nacional de Fusión para realizar los estudios de transporte en TJ-II.

Las descargas utilizadas para la comparación entre los dos códigos de transporte son las correspondientes al barrido en densidad y al barrido en configuraciones del modo de transporte mejorado. En las siguientes figuras se muestra la comparación de las difusividades térmicas obtenidas con los dos códigos de transporte.

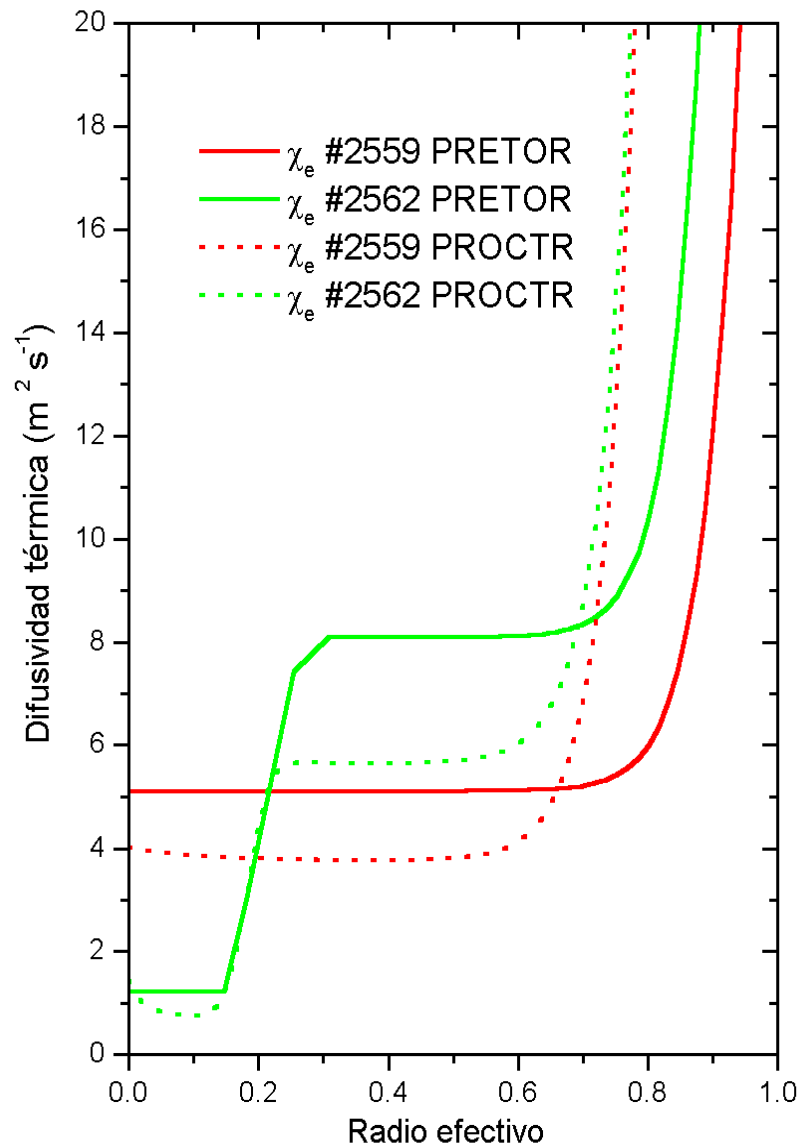


Fig 5.14. Comparación de los resultados de PRETOR-Stellarator y PROCTR de dos de las descargas del barrido en densidad.

En ambas gráficas se puede apreciar cómo los resultados de los dos códigos son muy similares indicando que los resultados obtenidos son coherentes, ya que las dos simulaciones parten de los mismos datos experimentales y se basan en el ajuste del perfil de temperatura y densidad electrónicos para obtener la difusividad térmica de los electrones. De todos modos hay una pequeña discrepancia en el centro del plasma debido a la diferente manera de realizar los cálculos que tienen los dos códigos.

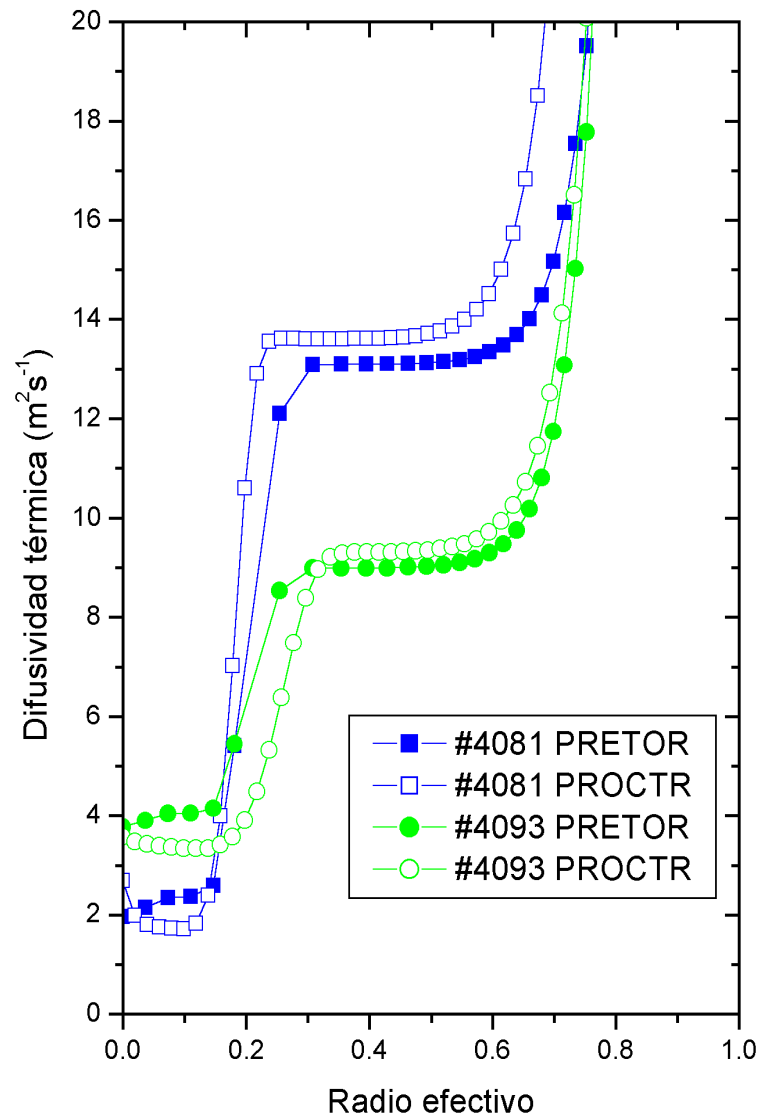


Fig. 5.15. Comparación de los resultados de PRETOR-Stellarator y PROCTR para alguna de las simulaciones del barrido en configuraciones.

5.6.- Conclusiones

Se ha partido del código PRETOR-Stellarator para realizar estudios de transporte en el plasma. La primera acción ha sido validar el código con varias descargas experimentales, para comprobar que PRETOR-Stellarator es capaz de reproducir sin dificultad los perfiles de densidad y temperatura del plasma dando resultados coherentes de la difusividad térmica de los electrones.

Una de las novedades de esta tesis ha sido el realizar los estudios del transporte con técnicas de participación remota introducidas en el Laboratorio de Participación Remota. Se ha seguido la operación del stellarator TJ-II, se han escogido las descargas de interés para su simulación y de éstas se han extraído los datos necesarios para la simulación del transporte. Todas estas acciones se han realizado desde el laboratorio de Barcelona, mientras que los datos y la máquina se encuentran en el Laboratorio Nacional de Fusión (Madrid).

Se ha estudiado también la energía almacenada en el plasma, comparando los resultados de PRETOR-Stellarator con los datos experimentales. En este caso los resultados no son tan buenos como en la reproducción de los perfiles de densidad y temperatura debido, entre otras cosas, a incertidumbres en los datos experimentales.

Una aportación de esta tesis ha sido la mejora del código PRETOR-Stellarator haciendo que las simulaciones en el centro del plasma sean más precisas introduciendo más puntos radiales donde calcular las diferentes magnitudes en esa zona. Para validar esta contribución se ha realizado un estudio de la sensibilidad de la difusividad térmica en función de la densidad de potencia, obteniendo que la dependencia entre estas dos cantidades es menos que lineal.

Otra de las novedades introducidas durante la realización de la presente tesis ha sido la implementación en PRETOR-Stellarator una función que permite el estudio de los modos de transporte mejorado, un tema de actualidad en la investigación sobre fusión nuclear controlada.

Para el estudio del modo de transporte mejorado en TJ-II se ha utilizado un barrido en densidad y un barrido en configuraciones. La simulación de los disparos correspondientes a cada uno de

estos barridos ha permitido corroborar la dependencia de la difusividad térmica con la densidad y de este modo ver cuándo se tiene transporte mejorado. En el caso del barrido en configuraciones ha permitido estudiar la influencia del valor de la transformada rotacional en el confinamiento del plasma.

Finalmente, se han comparado los resultados de las simulaciones de PRETOR-Stellarator en el barrido en configuraciones y en densidad con los obtenidos con PROCTR. Se ha constatado un buen acuerdo entre las difusividades térmicas obtenidas por los dos códigos, pudiendo concluir que los resultados obtenidos con PRETOR-Stellarator son coherentes con los de otro código ya validado y utilizado ampliamente para simulaciones en stellarators. De este modo se puede decir que PRETOR-Stellarator es un código con el que se pueden realizar estudios de transporte en stellarators.