

## *Conclusiones*

La utilización de códigos de simulación tiene un papel relevante en el desarrollo de la investigación en el campo de la fusión nuclear por confinamiento magnético porque permite conocer las propiedades físicas del plasma ya sea para interpretar su comportamiento en descargas reales producidas en los distintos dispositivos de fusión o para predecir las propiedades y evolución del plasma en la fase de diseño de un nuevo dispositivo. En este sentido la modelización de la difusión de energía y de partículas es un punto clave para comprender el comportamiento de los plasmas.

Como aportación novedosa a los estudios que se realizan en la simulación de plasmas de dispositivos de fusión, a lo largo de esta tesis doctoral se ha estudiado las propiedades del plasma de tokamaks y de stellarators y se ha contribuido al desarrollo del código de transporte PRETOR, creado en el JET. Estos estudios se han realizado dentro de la colaboración existente entre el *Departament de Física i Enginyeria Nuclear* de la *Universitat Politècnica de Catalunya (DFEN-UPC)* y el *Laboratorio Nacional de Fusión* del *Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)*.

## Simulación de tokamaks

Para conocer el grado de precisión de las simulaciones del código PRETOR es necesario comparar sus resultados con datos experimentales obtenidos en descargas de diversos dispositivos. En el capítulo 3 de esta tesis se han comparado, para diversas magnitudes físicas, los resultados obtenidos de la simulación de PRETOR con los correspondientes valores experimentales de diferentes pulsos de DIII-D, TFTR y JET. Estas descargas forman la primera ronda de validación de PRETOR y los datos experimentales se han obtenido del *ITER Profile Database* creado por el *ITER Confinement Database and Modelling Expert Group*.

Se han reproducido los perfiles radiales de la temperatura de electrones e iones y de la densidad, así como los valores de otras magnitudes globales del plasma como la potencia óhmica, la energía del plasma, el tiempo de confinamiento, el factor de seguridad y el valor medio de temperatura y densidad. La comparación con los valores experimentales de estas magnitudes ha puesto de manifiesto que:

- Por regla general los resultados obtenidos para las magnitudes globales presentan un buen acuerdo con los datos experimentales, teniendo en cuenta los amplios márgenes de error asociados a las medidas experimentales, que varían desde el 3 % hasta el 30 %.

- El tiempo de confinamiento, el contenido de energía del plasma, la carga efectiva media y el factor de seguridad presentan un error entre el 2 % y 15 % respecto del valor experimental. Pero para la potencia de calentamiento óhmico se obtiene un error mayor, alrededor del 20 - 30 %, debido al efecto acumulado del error en la simulación del perfil de temperatura.
- La magnitud que mejor se reproduce es el factor de seguridad con tan sólo un error del 2 - 10 % respecto al valor experimental.
- Los perfiles de densidad se ajusta con bastante corrección al experimento con valores de la desviación cuadrática media entre 0.10 y 0.25.
- La temperatura de electrones se simula satisfactoriamente, con unas desviaciones cuadráticas medias de 15 - 38 %. Sin embargo la temperatura de los iones presenta mayores discrepancias respecto de los valores experimentales, los valores de la desviación cuadrática media varía entre 25 y 45 %.
- Es necesario encontrar un compromiso entre los valores obtenidos de todas las magnitudes simuladas, especialmente entre la temperatura y la densidad.

En esta comparación debe destacarse que los errores experimentales son bastante grandes y no siempre están disponibles. A estos errores hay que añadir los propios de la simulación y de las aproximaciones de los modelos.

En el capítulo 3 también se presenta el estudio realizado sobre la parada de emergencia de ITER-DDR. Se han analizado diferentes estrategias para reducir la generación de potencia de forma rápida y segura: inyección de una pastilla de impurezas, consecución de una disrupción blanda e interrupción del suministro de combustible.

Por primera vez se han realizado estudios detallados sobre la parada de emergencia de ITER cuyos resultados demuestran que:

- El corte de suministro de combustible es un método efectivo para alcanzar los objetivos fijados para la parada de emergencia.
- Sin embargo, la densidad electrónica se reduce más lentamente que la densidad límite produciéndose una disrupción por límite de densidad.

Para evitar esta disrupción se propone inyectar potencia adicional por radiofrecuencia. Con un simple *feed-back* con la densidad se ha conseguido evitar esta disrupción, manteniendo la densidad por debajo del valor límite durante todo el tiempo de la parada.

El código PRETOR ha sido mejorado significativamente con la implementación de la dependencia de la eficacia de extracción de partículas con la densidad, el cálculo de la densidad límite y la transición del modo H al modo L del confinamiento. Estas

modificaciones del código han permitido adaptarlo a las necesidades específicas de la simulación de la parada de emergencia.

Un trabajo original realizado en el curso de la tesis ha consistido en la incorporación en el código PRETOR de varias modificaciones con el fin de mejorar sus resultados y hacer más versátil su funcionamiento. En el capítulo 4 se presenta la incorporación en el código de una nueva rutina, NBIVEC, para el cálculo de la deposición de potencia adicional por NBI. Otros cambios introducidos en el código consisten en añadir el seguimiento de la evolución temporal de los perfiles experimentales de la densidad de electrones y de la temperatura. El objetivo de estos cambios es mejorar la comparación entre datos experimentales y resultados de la simulación de otras magnitudes.

La rutina NBIVEC se incorpora a PRETOR de forma que para simular la deposición de potencia por NBI se puede escoger si se desea utilizar esta rutina o bien la rutina inicialmente implementada en PRETOR (*NBIPProfile*). Se han realizado simulaciones de las mismas descargas con ambas rutinas y los resultados obtenidos son muy similares por lo que la incorporación de NBIVEC en el código se justifica por el cálculo del término fuente de los iones térmicos resultantes de la moderación del haz, la corriente inducida en el plasma y la producción de neutrones debido a las reacciones plasma-haz, magnitudes que no son simuladas por la versión inicial de PRETOR pero sí por NBIVEC.

Los resultados de la simulación de la deposición de potencia NBI pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Los valores de la potencia total absorbida son similares a los valores experimentales, con errores entre el 2 y el 11 %.
- Los perfiles radiales de la deposición son bastantes buenos en la mayor parte del plasma ( $0.2 < \rho < 1.0$ ).
- En la región alrededor del eje magnético ( $\rho < 0.2$ ) las discrepancias con los perfiles experimentales son bastante grandes. Estas discrepancias son debidas principalmente a efectos geométricos como el cálculo del equilibrio magnético cerca del eje y a que, en esta región, se consideran volúmenes muy pequeños.

## Simulación de stellarators

Los stellarators se consideran una alternativa a los tokamaks para la construcción del próximo reactor de demostración debido a sus ventajas desde el punto de vista de rentabilidad comercial, principalmente debido a la posibilidad de funcionamiento continuo.

La investigación de stellarators ha adquirido en los últimos años una creciente importancia en el ámbito mundial, buena muestra de ello es la reciente puesta en funcionamiento del LHD japonés, del HSX de Estados Unidos, del heliac flexible TJ-II español y la construcción del proyecto Wendelstein-7X de Alemania. Además hay que destacar que el programa de fusión por confinamiento magnético español se centra en el dispositivo TJ-II de la Asociación EURATOM-CIEMAT.

Con el fin de disponer de un código capaz de simular descargas de stellarators, la versión de PRETOR V2.2 se ha tomado como punto de partida y ha sido modificada ampliamente hasta lograr la versión PRETOR-Stellarator. Esta modificación del código para adaptarlo a la simulación de stellarators presenta un aspecto inédito de este proyecto de tesis en el ámbito internacional.

Los cambios introducidos en el código afectan a múltiples módulos del mismo como: el equilibrio magnético, la geometría del plasma, los modelos de transporte, las leyes de escala y el control de la simulación. A lo largo del capítulo 6 se detallan las modificaciones implementadas, que se resumen en:

- La configuración magnética se obtiene utilizando el código numérico VMEC, cuyos resultados han sido incorporados a PRETOR-Stellarator.
- La geometría tridimensional del plasma se ha tenido en cuenta mediante el valor medio del tensor métrico  $\langle(\nabla\rho)^2\rangle$ .
- Se han implementado nuevos modelos de transporte relevantes en stellarators para determinar la conductividad térmica de iones y electrones y para la difusividad de los iones. También se han implementado nuevas leyes de escala del tiempo de confinamiento.
- Finalmente, también se han introducido parámetros propios para la simulación de stellarators.

Una vez realizadas todas las modificaciones del código hasta obtener la versión PRETOR-Stellarator se ha aplicado dicho código al análisis del transporte del TJ-II mediante la simulación de tres descargas. La primera de ellas (la número 955) pertenece a la primera campaña experimental del TJ-II y las otras dos (#3088 y #3158) son más recientes y presentan algunas propiedades, como la potencia radiada y la deposición de potencia ECRH, muy diferentes entre ellas.

Los resultados de las simulaciones realizadas sobre las descargas del TJ-II, presentados en detalle en el capítulo 7, demuestran que:

- Los perfiles experimentales de la temperatura de electrones se reproducen correctamente cuando se escogen los parámetros adecuados del modelo de la difusividad térmica.
- Los resultados obtenidos también son compatibles con los obtenidos en el CIEMAT mediante el código PROCTR, habitualmente utilizado para la simulación de stellarators.
- Los perfiles de la difusividad térmica también son comparables con los deducidos mediante simulaciones con PROCTR.
- Los valores experimentales de la potencia radiada y de la energía almacenada en el plasma han sido satisfactoriamente predichos mediante la simulación con PRETOR-Stellarator.

En el ámbito nacional la aplicación de PRETOR-Stellarator a la simulación del TJ-II, gracias a la colaboración existente entre el CIEMAT y la UPC, también presenta un aspecto novedoso de esta tesis. La importancia de este proyecto radica en que PRETOR es un código ampliamente difundido y que puede ser modificado fácilmente. El disponer del código PRETOR para la simulación de tokamaks y ahora también para stellarators junto con el código PROCTR permite diversificar los estudios de transporte realizados en España.

Las mismas descargas simuladas con PRETOR-Stellarator se han simulado con la versión inicial de PRETOR V 2.2 y de sus resultados se deduce que:

- El perfil experimental de la temperatura no es reproducido satisfactoriamente, este hecho muestra las dificultades del modelo de RLW para simular plasmas de stellarators de tamaño medio.
- Los valores de la difusividad térmica en el centro del plasma son mucho más altos que el obtenido con PRETOR-Stellarator, esto pone de manifiesto que los efectos de la geometría, incluso considerándolos de forma aproximada, pueden tener un papel importante en la simulación del transporte.

Todos estos resultados obtenidos permiten afirmar que las modificaciones realizadas en la versión inicial de PRETOR han conducido a un código capaz de simular correctamente dispositivos tipo stellarator.

El camino abierto por esta tesis doctoral permitirá ahondar en el estudio del plasma del heliac flexible TJ-II. El código está disponible para utilizarse e incorporar posibles nuevas modificaciones para adaptarlos a las necesidades que vayan apareciendo como la

modelización de barreras de transporte internas, simulación de la difusión de átomos neutros, etc. Estas actividades se realizarán dentro del proyecto “*Contribución al estudio remoto del transporte del TJ-II. Operación remota del espectrómetro de intercambio de carga*” recientemente aprobado en el marco del Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Ciencia y Tecnología, en coordinación con el Laboratorio Nacional de Fusión.