

Capítulo 9

Conclusiones

9.- Conclusiones

La participación remota es una herramienta muy útil en el estado actual de las investigaciones sobre fusión nuclear y su uso irá aumentando conforme aumente la complejidad de las máquinas que se construyan.

Gracias al gran desarrollo de las llamadas nuevas tecnologías hay multitud de software que permite realizar la participación remota, se han de estudiar las necesidades de cada caso y las ventajas e inconvenientes de cada programa para llegar a una solución que permita el empleo de esta técnica. Durante el desarrollo de esta tesis se han probado algunos de estos programas para poder utilizarlos en la participación remota.

Una aportación original de la presente tesis ha sido la puesta en marcha del Laboratorio Participación Remota en Fusión Nuclear. Es el primer proyecto de este tipo que se realiza en España, también es pionero a nivel mundial en el control remoto de diagnósticos, pues otros laboratorios de participación remota no llegan a controlar remotamente ningún dispositivo.

La puesta en marcha del Laboratorio de Participación Remota en Fusión Nuclear se ha enmarcado dentro del proyecto del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica, dependiente del Ministerio de Ciencia y Tecnología, FTN2000-1743-C02-01 y FTN2000-1743-C02-02 “Contribución al estudio remoto del transporte en TJ-II. Operación remota del espectrómetro de intercambio de carga”.

Para la realización del Laboratorio de Participación Remota se han instalado las herramientas necesarias en el Laboratorio Nacional de Fusión y en el *Departament de Física i Enginyeria Nuclear* que permiten la participación de un grupo del departamento en la operación del stellarator heliac flexible TJ-II. Durante las últimas campañas se ha manejado remotamente el espectrómetro de intercambio de carga desde Barcelona, de esta manera se ha conseguido una valiosa experiencia en la participación remota que podrá ser utilizada por otros grupos.

En la tesis se ha visto que utilizando herramientas comerciales al alcance de cualquier usuario se puede establecer una videoconferencia de suficiente calidad y fiabilidad para seguir y participar en la operación de una gran instalación científica. Esto significa que cualquier laboratorio con una infraestructura mínima puede participar en grandes experimentos que requieren una gran inversión.

Un resultado de la experiencia adquirida durante la realización de esta tesis es que gracias a las herramientas de la participación remota se ha dado mayor flexibilidad a la operación del diagnóstico de intercambio de carga, turnándose investigadores de los dos laboratorios en su manejo. También la puesta en marcha de este proyecto ha permitido la participación de un pequeño grupo universitario en la operación y análisis de datos de un gran experimento científico como es TJ-II.

Otra consecuencia de la creación de Laboratorio de Participación Remota ha sido la mejora de los estudios de fenómenos de transporte en el DFEN, pues en la actualidad se puede acceder de manera instantánea a la base de datos de las descargas de TJ-II. Con esta base de datos se puede validar perfectamente el código de transporte PRETOR-Stellarator, utilizado en el DFEN para los estudios de transporte en el plasma.

Este estudio podría aplicarse a futuras máquinas de fusión como ITER, en cuyo diseño y construcción participan científicos de diferentes países, y cuya explotación podría compartirse con herramientas de participación remota. Con esta tesis se ha demostrado que es posible participar remotamente e incluso controlar remotamente una máquina a través de internet sin que por ello haya merma considerable en la operación del experimento.

El código PRETOR ha sido ampliamente utilizado en los estudios de fusión por confinamiento magnético y puede considerarse como una buena herramienta para los estudios del transporte en el plasma. El modelo de Rebut-Lallia-Watkins implementado en PRETOR v2.2, ha sido validado para descargas de grandes tokamaks pero no es válido para la simulación de descargas de stellarators.

Hay diferencias entre tokamaks y stellarator que hacen que el código PRETOR no sea directamente aplicable a máquinas tipo stellarator, por tanto ha sido necesario un cambio en el código para poder simular descargas en este tipo de máquinas.

En el *Departament de Física i Enginyeria Nuclear*, gracias a los convenios de colaboración con la asociación Euratom-Ciemat “Ingeniería de plasmas en reactores de fusión termonuclear tipo stellarator” y “Desarrollo del código PRETOR para su aplicación a stellarators. Validación experimental en TJ-II”, se han introducidos los cambios necesarios en los cálculos geométricos y el transporte para poder simular plasmas en stellarators. Se ha realizado una primera tanda de simulaciones con PRETOR-Stellarator encaminadas a validar esta versión del código. Los primeros resultados y su comparación con el código PROCTR parecen indicar que los cambios introducidos son válidos para la simulación de plasmas en stellarators.

En esta tesis partiendo del código PRETOR-Stellarator se han realizado 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 original 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 se calculan las diferentes magnitudes en esa zona. Para validar la nueva versión del código se ha hecho 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.

Otra actividad realizada durante el desarrollo de la tesis ha sido comparar 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 de los dos códigos, pudiendo concluir que los resultados obtenidos con PRETOR-Stellarator son coherentes con los de otro código ya validado. De este modo se puede decir que PRETOR-Stellarator es un código con el que se pueden realizar estudios de transporte en stellarators.

En la realización de esta tesis doctoral además de los estudios de transporte se ha contado con una variante más experimental que ha consistido en la comprensión de funcionamiento y manejo por participación remota de un diagnóstico del heliac flexible TJ-II. En un dispositivo de fusión experimental es muy importante tener múltiples diagnósticos para obtener diferentes parámetros del plasma y así conocer mejor su comportamiento en diversas circunstancias. Uno de estos diagnósticos es el de intercambio de carga analizador de partículas neutras.

El diagnóstico de intercambio de carga permite, a través del análisis energético de los átomos neutros que escapan del plasma, conocer diversas magnitudes de los iones centrales que forman el plasma. La principal magnitud que mide es la temperatura de los iones a partir del espectroenergético, si se trata de un plasma de baja densidad. Con las debidas correcciones también se puede aplicar a plasmas densos.

El heliac flexible TJ-II dispone de dos analizadores de partículas neutras montados en la misma sección poloidal. Estos dos analizadores permiten encontrar el espectro energético de dos puntos del plasma de la sección poloidal, y variando su posición se puede barrer toda la sección. El espectrómetro cuenta con todo el software asociado necesario para realizar el análisis de los datos obtenidos.

Durante la realización de esta tesis se ha comprendido el principio físico y funcionamiento del espectrómetro de intercambio de carga. También se ha aprendido a manejarlo y resolver los posibles problemas asociados a su operación.

Este diagnóstico cuenta con dos analizadores, uno de 5 canales y un Acord12, este último analiza un mayor número de energías por cada descarga. Una mejora que se ha realizado en el Laboratorio Nacional de Fusión ha sido una modernización del analizador de 5 canales para pasar a ser un Acord12, pues es sencilla su adaptación. Otra mejora prevista es cambiar la longitud del tornillo para permitir barrer toda la sección donde se encuentra enclavado el diagnóstico.

Una posible mejora a este diagnóstico sería la de añadir otra línea de visión, para con menos descargas obtener más puntos radiales, con lo que sería más sencillo completar un perfil radial de flujo de neutros.

Diagnósticos del mismo tipo están en funcionamiento en diferentes laboratorios de investigación del mundo, tanto en tokamaks como stellarators. Esta variedad de localizaciones permite compartir la experiencia de operación de los diferentes grupos.

Una aportación original de esta tesis ha sido el estudio las derivas poloidales de los iones en la cámara de vacío de TJ-II para campos magnéticos estándar e invertidos, en dos configuraciones

magnéticas diferentes. A partir de los flujos de neutros se ha calculado la temperatura iónica en cuatro casos diferentes.

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

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

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

A partir de un perfil de temperatura iónica del heliac flexible TJ-II se ha estudiado el transporte iónico con PRETOR-Stellarator. Ésta era una opción del código que todavía no se había utilizado por no disponer de datos de perfiles de temperatura de los iones.

Una novedad de esta tesis ha sido el realizar un estudio de la difusividad térmica de los iones con PRETOR-Stellarator, pues hasta ahora este código solo había sido utilizado para estudios de los electrones.

Para poder realizar el estudio de la difusividad térmica de los iones se ha tenido que asegurar que las funciones implementadas en el código eran las correctas. También se ha introducido un nuevo método para simular la densidad de electrones, de modo de obtener mejores resultados en el cálculo del perfil de la temperatura iónica.

En los cálculos realizados se ha visto que la difusividad de los iones es claramente mayor que la de los electrones. Además presenta un máximo en el centro, este máximo es debido a la poca colisionalidad de los iones en esa zona del plasma. Los resultados de PRETOR-Stellarator han sido comparados y completados con los de PROCTR para la misma serie de descargas. Los resultados de los dos códigos son bastante similares en el centro, pero en el borde sus resultados difieren más claramente. Esta diferencia en el borde no es muy importante que se produzca pues en esa capa del plasma no se tienen resultados experimentales.

En el octavo capítulo de esta tesis se han realizado una serie de medidas y cálculos para investigar el perfil de temperatura iónica en el borde de TJ-II. Se ha comprobado que el perfil de la temperatura es plano más allá de la última superficie de flujo cerrada y que además se mantiene a pesar de la caída de la densidad. Una novedad ha sido la medida de la temperatura de los iones más allá de un radio efectivo de 0.65 para una configuración con un radio menor medio grande, no se había realizado hasta ahora por limitaciones en el dispositivo experimental.

Se ha realizado un estudio de transporte utilizando una adaptación del modelo Alcator C Mod, en el que se deduce que la difusividad térmica de los iones es muy alta, pero este resultado es poco significativo porque es un valor numérico que compensa el casi nulo gradiente de temperatura iónica. Analizando la ecuación del flujo de energía se observa que el flujo viene dado principalmente por el flujo convectivo, que depende de la velocidad de *pinch*, que es una velocidad introducida en el flujo de calor de los iones y que normalmente no es tenida en cuenta por los códigos de cálculo.

Un resultado novedoso ha sido la explicación del perfil plano dentro de la última superficie cerrada de flujo del plasma. Éste es plano por la magnitud del radio de las órbitas banana de los iones dentro del plasma, el radio es muy grande, con lo que los iones se distribuyen y mezclan rápidamente a lo largo de todo el perfil del plasma, resultando este perfil plano.

Otra aportación de la presente tesis ha sido la constatación de la existencia de un plasma residual fuera de la última superficie de flujo cerrada. Este hecho puede explicarse por el tipo de partículas que analiza el espectrómetro de intercambio de carga y la posición de los limitadores en TJ-II. Como analiza partículas fuertemente atrapadas, con una componente muy baja de la

velocidad paralela a las líneas magnéticas las partículas de fuera de la última superficie magnética no tienen tiempo de llegar a los limitadores, que haría que las partículas se perdiesen, en cambio rebotan antes de llegar a los limitadores con lo que pueden medirse y calcular la temperatura, que resulta ser la misma que dentro del plasma, pues miden el mismo tipo de partículas.

Un posible trabajo de futuro podría ser ampliar los estudios de la difusividad térmica de los iones. Uno de los resultados de esta tesis es que para plasma de baja densidad los perfiles de temperatura iónica son planos. Si se extrapola este resultado a todos los disparos de TJ-II se puede realizar el estudio de la difusividad térmica de los iones suponiendo siempre un perfil plano de la temperatura de los iones, de este modo conociendo la temperatura en un solo punto de la temperatura iónica se puede ajustar el perfil por una recta y con esta hipótesis realizar los estudios de transporte de los iones.

Otro trabajo de futuro sería extender estas medidas de la temperatura de los iones en el borde a otras configuraciones y diferentes densidades, además medir en la zona superior e inferior para comprobar las posibles asimetrías.

Otro trabajo a realizar más adelante es mejorar la conexión de los dos laboratorios para ganar calidad en la participación remota. Si se pudiese pasar a una conexión por Internet de segunda generación se mejoraría tanto la calidad como la fiabilidad de la operación remota.