



Departament de Física i Enginyeria Nuclear
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya



Estudio del transporte de energía en plasmas de fusión
termonuclear con medidas experimentales obtenidas del
espectrómetro de intercambio de carga, realizado mediante
técnicas de participación remota

Tesis doctoral presentada por:
JOSEP MARIA FONTDECABA CLIMENT

Octubre 2003

Director de tesis:
Dr. JAVIER DIES LLOVERA

“Prefiero la crítica más dura de un hombre inteligente
que la aprobación irreflexiva de la gran masa.”
Johannes Kepler , (1571-1630)

“Un científico puede descubrir una nueva estrella,
pero no puede hacer una estrella nueva.
Tendría que pedir a un ingeniero que se la hiciera.”
Gordon L. Glegg, (1969)

“- Bueno, parece algo brillante y absolutamente comercializable.
- Gracias. He cumplido mi meta como ingeniero.”
Scott Adams, (1989)

Agradecimientos

En primer lugar quiero dar las gracias al Dr. Joan Fontanet Sáez, con él empecé el proyecto fin de carrera y he continuado la tesis, siendo un buen amigo y compañero de trabajo. Sin él todavía estaría pensando sobre el tema en qué hacer mi tesis.

Mi agradecimiento a los doctores Rosa Balbín, Francisco Castejón y Daniel López Bruna, del Laboratorio Nacional de Fusión. Por su ayuda durante el desarrollo de mi tesis, dando ideas, resolviendo dudas y enseñándome mucho sobre investigación en fusión. También les doy las gracias por procurar que mis estancias en el Laboratorio Nacional de Fusión fuesen lo más agradables posibles.

Otra persona a la que estoy agradecido y que me ha ayudado a llevar mi tesis adelante es el Dr. Sergei Petrov del *Ioffe Physycal-Technical Institute* de Sant Petersburgo, que he conocido durante mis estancias en el Laboratorio Nacional de Fusión. Él ha tenido la paciencia suficiente para despejar las dudas que tenía sobre el espectrómetro de intercambio de carga.

También debo dar las gracias a los doctores John How y Volker Schmidt de CEA-Cadarache y RFX- Padova respectivamente por sus consejos sobre la participación remota.

Una mención también para el Dr. Ferran Tarrasa Blanes, sus conversaciones de los viernes por las tardes han sido muy provechosas, además de sus soluciones a cualquier problema informático que se presentase y ayuda en la realización de las gráficas.

Mi agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Javier Dies que me ha ayudado en la realización y redacción de la tesis. Me ha avalado en la petición de la beca FPI, y me ha permitido participar en los proyectos financiados: FTN2000-1743-C02-01 del Plan Nacional de I+D, C-2544 y C-3327 con la Asociación EURATOM-Ciemat para la Fusión.

Dentro de esta sección de agradecimientos no debería dejarme al *Departament de Física i Enginyeria Nuclear - Secció d'Enginyeria Nuclear*, por poner a mi disposición los medios técnicos y humanos que han hecho posible la realización de este trabajo.

Otro grupo al que quiero expresar mi agradecimiento es la Asociación Euratom-Ciemat Laboratorio Nacional de Fusión, con el Dr. Carlos Alejaldre a la cabeza, donde he realizado algunas estancias de investigación muy provechosas. Este agradecimiento se hace extensible a todos los miembros de la asociación por todo lo que me han ayudado.

Como se dice en inglés *and last but not least* muchas gracias a todos los becarios que han pasado por la *Secció d'Enginyeria Nuclear* durante los años que ha durado la realización de mi tesis, nos lo hemos pasado bien.

Finalmente, decir “Amb el suport del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya”, son los que me han pagado puntualmente la beca para poder realizar esta tesis doctoral.

Índice

Introducción.....	6
1.- Fusión nuclear.....	9
1.1.- Principio físico.....	10
1.2.- Fusión termonuclear controlada.....	11
1.2.1.- Balance de energía.....	13
1.2.2.- Criterio de Lawson e ignición.....	16
1.3.- Confinamiento magnético.....	17
1.3.1.- Tokamaks.....	18
1.3.2.- Stellarators.....	19
1.4.- Estado actual.....	19
1.4.1.- JET.....	20
1.4.2.- Tore-Supra.....	21
1.4.3.- Helic flexible TJ-II.....	21
1.4.4.- LHD.....	23
1.4.5.- Wendelstein 7-X.....	23
1.4.6.- ITER.....	24
1.5.-Conclusiones.....	26
2.- PRETOR-Stellarator.....	27
2.1.- Transporte en el plasma.....	28
2.1.1.- Transporte clásico.....	29
2.1.2.- Transporte neoclásico.....	31
2.1.3.- Transporte anómalo.....	33
2.2.- PRETOR.....	33
2.2.1.- Estructura de PRETOR.....	34
2.2.2.- Modelos implementados.....	36
2.3.- Diferencias entre tokamaks y stellarators.....	42
2.4.- Desarrollo del código PRETOR-Stellarator.....	43
2.4.1.- Cálculos geométricos.....	43
2.4.2.- Modelos de transporte.....	46
2.4.3.- Estudios realizados.....	48
2.5.- Conclusiones.....	51

3.- Diagnóstico de intercambio de carga.....	52
3.1.- Principio físico.....	53
3.2.- Medidas que realiza.....	54
3.2.1.- Medida de la temperatura iónica.....	55
3.3.- Diagnóstico de intercambio de carga analizador de partículas neutras de TJ-II.....	56
3.3.1.- Analizador de intercambio de carga.....	56
3.3.2.- Propósito y principio de operación del aparato (Acord12).....	57
3.3.3.- Mecánica.....	60
3.3.4.- Vacío.....	64
3.3.5.- Electrónica.....	65
3.3.6.- Campos magnéticos.....	67
3.3.7.- Control del espectrómetro.....	68
3.3.8.- Sistema de adquisición de datos del espectrómetro de intercambio de carga.....	71
3.4.- Conclusiones.....	73
4.- Participación Remota.....	75
4.1.- Motivación.....	76
4.2.- Tipos de participación remota.....	79
4.2.1.- Acceso a datos.....	80
4.2.2.- Acceso a herramientas de cálculo.....	81
4.2.3.- Participación en reuniones.....	81
4.2.4.- Control remoto.....	82
4.3.- Software para la participación remota.....	83
4.3.1.- Virtual Rooms Videoconferencing System.....	83
4.3.2.- Microsoft Netmeeting.....	84
4.3.3.- iVisit.....	85
4.3.4.- Microsoft Messenger.....	86
4.3.5.- Yahoo Messenger.....	87
4.3.6.- Citrix.....	87
4.3.7.- Virtual Networking Computing.....	88
4.4.- Participación remota entre el Laboratorio Nacional de Fusión y el <i>Departament de Física i Enginyeria Nuclear</i>	88

4.4.1.- Soluciones adoptadas para la participación remota.....	90
4.4.2.- Instalaciones en el Laboratorio Nacional de Fusión (Madrid).....	93
4.4.3.- Instalaciones en el <i>Departament de Física i Enginyeria Nuclear</i> (Barcelona).....	94
4.4.4.- Experiencia de operación.....	95
4.4.5.- Futuro.....	98
4.5.- Conclusiones.....	99
5.- Estudios de transporte.....	101
5.1.- Validación con descargas de TJ-II.....	102
5.1.1.- Datos experimentales.....	102
5.1.2.- Análisis del transporte.....	103
5.1.3.- Discusión.....	107
5.2.- Modificaciones del código.....	108
5.2.1.- Variación de la conductividad térmica en función del perfil de deposición de potencia.....	109
5.3.- Modos de confinamiento mejorado: barrido en densidad.....	112
5.3.1.- Datos experimentales.....	113
5.3.2.- Simulaciones y análisis del transporte.....	114
5.4.- Modos de confinamiento mejorado: barrido en configuraciones.....	117
5.4.1.- Datos experimentales.....	118
5.4.2.- Simulaciones y análisis del transporte.....	120
5.5.- Comparación con PROCTR.....	122
5.6.- Conclusiones.....	125
6.- Medidas con el espectrómetro de intercambio de carga.....	127
6.1.- Espectros de energía.....	128
6.2.- Flujos de neutros y asimetrías poloidales en el heliac flexible TJ-II.....	129
6.2.1.- Datos experimentales.....	129
6.2.2.- Medida de flujos.....	131
6.2.3.- Asimetrías poloidales en TJ-II.....	132
6.2.4.- Discusión.....	135
6.3.- Mejora del confinamiento mediante la inducción de corriente.....	136
6.3.1.- Introducción.....	136

6.3.2.- Datos experimentales.....	137
6.3.3.- Cálculo de la temperatura iónica.....	138
6.3.4.- Discusión.....	148
6.4.- Conclusiones.....	149
7.- Transporte iónico en TJ-II.....	150
7.1.- Datos experimentales.....	151
7.2.- Simulaciones con PRETOR-Stellarator.....	153
7.3.- Discusión.....	159
7.4.- Conclusiones.....	160
8.- Perfiles planos de la temperatura en TJ-II.....	162
8.1.- Medidas experimentales.....	163
8.2.- Análisis del transporte.....	167
8.3.- Discusión.....	171
8.4.- Conclusiones.....	173
9.- Conclusiones.....	174
Anexo. Símbolos y siglas utilizados.....	184
Bibliografía.....	189
Ponencias y publicaciones.....	198

Introducción

Introducción

Con el crecimiento actual de la población y el aumento del nivel de vida a escala mundial, se espera un fuerte incremento de la demanda de electricidad en todo el planeta. Este aumento no puede ser compensado con centrales eléctricas que quemen combustibles fósiles debido a que produciría un fuerte aumento del efecto invernadero. Para ello se deben investigar nuevas fuentes de energía, una de ellas es la fusión termonuclear.

La fusión nuclear es la reacción entre dos núcleos ligeros para dar lugar a un tercero más pesado. En esta reacción se desprende una gran cantidad de energía por unidad de masa, pero para que se produzca se necesitan condiciones extremas de densidad o temperatura.

Para producir energía eléctrica a partir de la fusión termonuclear son necesarios los estudios de transporte de energía, que nos indican el tiempo que ésta tarda en escapar del plasma. Para realizar este tipo de estudios son importantes códigos de cálculo fiables, ya que algunos de los fenómenos de transporte de dentro del plasma normalmente se estudian a partir de leyes empíricas debido a la gran complejidad de éstos. Para el mejor conocimiento del plasma los dispositivos experimentales actuales tienen una gran variedad de diagnósticos que permiten obtener las principales características del plasma confinado en la máquina.

En algunos de los actuales experimentos de fusión se utilizan las técnicas de participación remota. Además en los futuros experimentos, como puede ser ITER, se potenciará este aspecto pues para su diseño y construcción participarán científicos de muchos países diferentes. Para explotar los resultados de este reactor se prevé utilizar las herramientas de participación remota, permitiendo que todos los colaboradores disfruten de sus resultados.

En esta tesis, gracias a una colaboración entre el *Departament de Física i Enginyeria Nuclear* (DFEN) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) y la Asociación Euratom-Ciemat Laboratorio Nacional de Fusión, y dentro del proyecto del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología “Contribución al estudio remoto

del transporte en TJ-II. Operación remota del espectrómetro de intercambio de carga” se ha contribuido a la creación de un Laboratorio de Participación Remota en Fusión en el DFEN.

Una vez puesto en marcha Laboratorio Remoto de Fusión, se han utilizado las herramientas implementadas para realizar diversos estudios de transporte. La primera tarea ha consistido en acabar de validar el código de cálculo PRETOR-Stellarator, además de introducir algunas mejoras en el mismo. También se han estudiado diversos casos de confinamiento mejorado de la energía en el plasma.

Otra de las tareas realizadas desde el Laboratorio de Participación Remota ha sido el control, en días de operación, del espectrómetro de intercambio de carga analizador de partículas neutras de TJ-II. Este diagnóstico permite obtener la temperatura de los iones en el plasma, además de realizar estudios sobre el flujo de neutros en el plasma.

Finalmente, a partir de datos obtenidos con el espectrómetro de intercambio de carga se ha podido hacer un estudio sobre el transporte iónico en TJ-II, validando también para transporte iónico el código PRETOR-Stellarator. Por último se han realizado medidas de la temperatura iónica fuera de la última superficie cerrada de flujo, encontrando un perfil plano a lo largo de todo el radio menor y se ha dado una posible explicación a este fenómeno

Esta tesis se ha enmarcado dentro de los siguientes proyectos:

- Proyecto coordinado del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo 2000-2003 del Ministerio de Ciencia y Tecnología titulado “Contribución al estudio remoto del transporte en TJ-II. Operación remota del espectrómetro de intercambio de carga” entre la asociación Euratom-Ciemat Laboratorio Nacional de Fusión FTN2000-1743-C02-01 y el *Departament de Física i Enginyeria Nuclear*, FTN2000-1743-C02-02.
- Convenio de colaboración con la Asociación Euratom-Ciemat “Ingeniería de plasmas en reactores de fusión termonuclear tipo stellarator”.
- Convenio de colaboración con la Asociación Euratom-Ciemat “Desarrollo del código PRETOR para su aplicación a stellarators. Validación experimental en TJ-II”.