

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Una Revisión Sobre Fusión Nuclear y
Aplicación Inicial de Multipow a Datos del
Tokamak ASDEX del Instituto Max Planck

Autor: José Manuel Díaz Cano

Tutores: Manuel Toscano Jiménez

Juan Manuel Ayllón Guerola

Dep. Física Aplicada III
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**Una Revisión Sobre Fusión Nuclear y Aplicación Inicial de Multipow a
Datos del Tokamak ASDEX del Instituto Max Planck**

Autor:

José Manuel Díaz Cano

Tutores:

Manuel Toscano Jiménez

Profesor titular de universidad

Juan Manuel Ayllón Guerola

Investigador de la Universidad de Sevilla

Dep. de Física Aplicada III
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Grado: Una Revisión Sobre Fusión Nuclear y Aplicación Inicial de Multipow a Datos del Tokamak ASDEX del Instituto Max Planck

Autor: José Manuel Díaz Cano

Tutores: Manuel Toscano Jiménez

Juan Manuel Ayllón Guerola

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

El mayor enemigo del conocimiento no es la ignorancia, sino la falsa creencia de poseer el conocimiento.

(Stephen William Hawking)

Agradecimientos

Resulta difícil nombrar en el apartado a todos y cada una de las personas que me han ayudado en el camino durante todos estos años. De todos ellos siempre he aprendido innumerables lecciones de vida, tanto en el ámbito laboral o universitario como en el íntimo.

Gracias a toda mi familia por el apoyo incondicional desde siempre. A mi padre, madre y hermana, por hacer que todo el camino sea más fácil, apoyándome en mis derrotas y celebrando mis victorias, y que por todo lo pasado se sientan orgullosos de mí.

Gracias a mis amigos, de esos que se cuentan con los dedos de una mano, pero de los que sé que siempre estarán ahí para despejarse, en lo bueno y en lo malo.

Gracias a mi pareja, quien siempre ha estado ahí, animándome en los momentos malos y sabiendo sacarme una sonrisa cada vez que estaba agobiado o decaído.

Gracias a todos los profesores que me ha llevado hasta aquí. A mi maestra del colegio y mi profesor de matemáticas, a quienes estaré siempre agradecido por ser estrictos y cariñosos a la vez y a los que considero culpables de mucho de lo que soy en el ámbito universitario. A todos los profesores de la ETSI, por hacernos ver el mundo de otra forma, en especial a Manuel Toscano, mi tutor, quien ha incentivado en mí la motivación por avanzar.

Gracias a todos he logrado llegar hasta aquí. Es el trabajo de todos.

Resumen

En los tiempos que corren, el ser humano se ha acostumbrado a vivir con una serie de necesidades “no vitales”. Tener agua caliente, luz o un automóvil para ir al trabajo son herramientas y facilidades que nos hacen la vida más fácil y de mayor calidad. Para lograr este estado de bienestar, el hombre, a lo largo de los años, ha explotado los recursos que le ha ofrecido el planeta en busca de energía. En la actualidad, esta energía se obtiene de la quema de combustibles fósiles, de centrales nucleares... Sin embargo, a excepción de las energías renovables, la obtención de este recurso suele producir daño en nuestro planeta. Por ello, sumado a que los recursos tienen una duración limitada, se siguen buscando nuevas fuentes de obtener energía en un futuro no muy lejano. En este concepto aparece la energía nuclear de fusión, siendo una de las fuentes de energía con mayor futuro en el mundo. Al no ser tan contaminante como los combustibles fósiles y no producir residuos radiactivos como la fisión, es una esperanza para la obtención de gran cantidad de energía limpia.

El objetivo de este proyecto es realizar un primer acercamiento al campo de la fusión nuclear por confinamiento magnético, al ser éste el tipo de confinamiento desarrollado en los reactores experimentales actuales. Para ello, se describirán los aspectos básicos más importantes, tanto desde el punto de vista teórico como práctico, relacionados con esta forma de obtención de energía, a la vez que se estudiarán los distintos tipos de reactores de confinamiento magnético, incluyendo los más importantes de cada uno.

La última parte se centrará en el desarrollo de la herramienta Multipow, la cual nos muestra de una forma más sencilla y visual los modos de vibración que se producen en el plasma. Esta herramienta de análisis ha sido desarrollada gracias a la colaboración del Instituto Max-Planck de Física del Plasma, en Alemania, quien ha brindado los datos y archivos sobre su reactor Tokamak ASDEX necesarios para la realización del proyecto, además de una plataforma virtual donde trabajar y llevar a cabo las simulaciones.

Abstract

In these times, the human being has become accustomed to living with a series of "non-vital" needs. Having hot water, light or a car to go to work are tools and facilities that make life easier and higher quality. To achieve this state of wellbeing, man, over the years, has exploited the resources that the planet has offered in search of energy. At present, this energy is obtained from the burning of fossil fuels such as oil or coal, from nuclear power plants... However, with the exception of renewable energy, obtaining this resource usually produces damage on our planet. That is why, in addition to limited resources, new sources of energy are still being sought in the not too distant future. In this concept appears nuclear fusion energy, being one of the energy sources with the greatest future in the world. By not being as polluting as fossil fuels and not producing radioactive waste like fission, it is a hope for the obtaining of a lot of clean energy.

The objective of this project is to make a first approach to the field of nuclear fusion by magnetic confinement, since this is the type of confinement developed in the current experimental reactors. This will describe the most important basic aspects, both theoretically and practically, related to this way of obtaining energy, while studying the different types of magnetic confinement reactors, including the more important of each one.

The last part will focus on the development of the Multipow tool, which shows us in a simpler and more visual way the vibration modes that occur in the plasma. This analysis tool was developed thanks to the collaboration of the Max-Planck Institute of Plasma Physics in Germany, which provided the necessary data and files on its Tokamak ASDEX reactor, necessary for the realization of the project, as well as a virtual platform where to work and carry out the simulations.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Fusión Nuclear, Principios Básicos	5
2.1. <i>Comparación entre fusión y fisión nuclear</i>	8
2.2. <i>Fusión nuclear en la naturaleza y en el laboratorio</i>	9
3 Reactores de fusión por confinamiento magnético	15
3.1. <i>Reactores de fusión de tipo Tokamak</i>	16
3.1.1 Bobinas magnéticas	18
3.1.2 Vasija del reactor	18
3.1.3 Limitadores del plasma	19
3.1.4 Repostaje de combustible	20
3.1.5 Procedimiento de descargas del reactor	20
3.2. <i>Principales reactores de fusión de tipo Tokamak</i>	21
3.2.1 JET (Joint European Torus)	22
3.2.2 ASDEX Upgrade (Axially Symmetric Divertor Experiment)	23
3.2.3 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)	25
3.2.4 DEMO (DEMONstration Power Station)	26
3.3. <i>Reactores de fusión de tipo Stellarator</i>	27
3.3.1 Bobinas magnéticas	27
3.3.2 Vasija del reactor	28
3.3.3 Límite del plasma	29
3.3.4 Repostaje de combustible	30
3.3.5 Procedimiento de descargas del reactor	30
3.4. <i>Principales reactores de fusión de tipo Stellarator</i>	31
3.4.1 Wendelstein 7-X	31
3.4.2 TJ-II	32
4 Estudio del plasma en el reactor	33
4.1. <i>Plasma en la naturaleza y en nuestro planeta</i>	34
4.2. <i>Factores relevantes en su estudio</i>	35

4.3.	<i>Comportamiento del plasma en el campo magnético</i>	36
4.4.	<i>Diagnósticos</i>	40
4.5.	<i>Diagnóstico ECE</i>	40
5	Multipow y Programación	43
5.1.	<i>Herramientas utilizadas</i>	44
5.2.	<i>Programación de Multipow</i>	49
5.2.1.	Lectura de datos y calibración de los mismos	49
5.2.2.	Calculo de la rho poloidal a partir de R y Z y eliminación de canales defectuosos	53
5.2.3.	Transformada de Fourier y representación	59
5.3.	<i>Conclusiones y trabajo futuro</i>	71
	Referencias	73
	Bibliografía General	78

Índice de Figuras

Figura 1.1. Industria expulsando CO ₂ y otros compuestos a la atmósfera (1)	2
Figura 1.2. Deshielo de los polos y especies que lo sufren (2)	2
Figura 1.3. Evolución del consumo de energía mundial a lo largo de los años (3).....	3
Figura 1.4. Desechos radioactivos de una central nuclear (4).....	3
Figura 2.1. Energía de enlace por nucleón con respecto al número de nucleones totales (5).....	6
Figura 2.2. Relación entre la masa y la energía, ecuación de Einstein (6)	6
Figura 2.3. Barrera de Coulomb (7)	7
Figura 2.4. Animación sobre el efecto túnel (8).....	8
Figura 2.1.1. Almacén subterráneo de residuos nucleares (9).....	8
Figura 2.2.1. El Sol (10)	9
Figura 2.2.2. Cadena protón-protón (11).....	10
Figura 2.2.3. Ciclo del carbono (12)	10
Figura 2.2.4. Probabilidad de distintas reacciones de fusión para distintos niveles de energía (13)	11
Figura 2.2.5 Representación artística de la producción de tritio en el reactor (14).....	12
Figura 2.2.6. Sección eficaz de distintas reacciones de fusión para distintos niveles de energía (15)	12
Figura 2.2.7. Proceso de confinamiento inercial (16).....	13
Figura 2.2.8. Representación del confinamiento magnético (17)	13
Figura 3.1. Trayectorias de iones y electrones al aplicar campo magnético (18)	16
Figura 3.1.1. Representación artística de un reactor tipo Tokamak (19)	17
Figura 3.1.2. Enrollamiento del campo magnético (20).....	17
Figura 3.1.1.1. Siete de las 16 bobinas magnéticas principales del ASDEX durante su montaje (21)	18
Figura 3.1.2.1. Trabajadores realizando labores de mantenimiento en el interior de la vasija de un reactor tipo Tokamak (ASDEX) (22)	19
Figura 3.1.3.1. En rojo: Placas de los colectores del divertor (23)	19
Figura 3.1.4.1. Gránulo de deuterio congelado evaporándose (cuadro rojo) (ASDEX) (24).....	20

Figura 3.1.5.1. Descarga de plasma (ASDEX) (25)	21
Figura 3.2.1.1 Representación artística del reactor experimental JET (26)	22
Figura 3.2.2.1. Interior del ASDEX (27).....	23
Figura 3.2.2.2. Sección transversal de ASDEX (28)	24
Figura 3.2.2.3. Equipo de trabajadores del ASDEX, compuesto por más de 200 científicos (29)	24
Figura 3.2.3.1. Representación artística del futuro reactor de fusión ITER en funcionamiento (30)	25
Figura 3.2.3.2. Construcción del reactor ITER (31)	26
Figura 3.2.4.1 Evolución prevista de los reactores tipo Tokamak (32)	26
Figura 3.3.1 Representación reactor tipo Stellarator (33).....	27
Figura 3.3.1.1. Bobina magnética del Stellarator Wendenstein 7-X durante su montaje (34).....	28
Figura 3.3.2.1. Interior de un reactor tipo Stellarator (35).....	29
Figura 3.3.3.1. Distribución de las placas del divertor en un reactor tipo Stellarator (36).....	29
Figura 3.3.5.1. Descarga en el reactor Stellarator Wendelstein 7-X (37).....	30
Figura 3.4.1.1. Representación del plasma en el reactor Wendelstein 7-X (38)	31
Figura 3.4.1.2. Primer plasma en Wendelstein (39).....	32
Figura 3.4.2.1. Reactor TJ-II visto desde arriba (40)	32
Figura 4.1. Evolución de los estados de la materia conforme se le va aumentando su energía (41)	33
Figura 4.1.1. Auroras boreales, un tipo de plasma en nuestro planeta (42).....	34
Figura 4.1.2. Tipos de plasma según su densidad electrónica y su temperatura (43).....	35
Figura 4.3.1. Movimiento de las partículas tipo “trapped” en el reactor (44).....	37
Figura 4.3.2. Corte transversal de un reactor Tokamak en el que se muestran las líneas de coordenada magnética p , siendo el eje y la altura Z en metros y la distancia radial R en metros, con algunos canales de medida en forma de círculos negros (45)	38
Figura 4.3.3. Resultado de un ECE. Frecuencia del plasma respecto al radio menor normalizado, mostrando los distintos modos de vibración	39
Figura 4.5.1. Receptor de datos de ECE (46)	41
Figura 5.1. Interfaz de Linux utilizada para trabajar.....	44
Figura 5.1.1. Representación gráfica de la variación de la temperatura adimensional del plasma en escala logarítmica en función de la frecuencia y del tiempo en un “shot”	45
Figura 5.1.2. Interfaz de Diaggeom.....	46
Figura 5.1.3. Interfaz de Matlab	47
Figura 5.1.4. Base de datos de ISIS, donde se encuentran codificados los diferentes “shot files”	48
Figura 5.2.1.1. Utilización de la librería “sf” para leer los datos del diagnóstico RMC.....	49
Figura 5.2.1.2. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, dónde se representa la variación de la temperatura adimensional del plasma en escala logarítmica para distintas frecuencias en el tiempo.....	50
Figura 5.2.1.3. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle	50
Figura 5.2.1.4. Calibración de los datos de RMC.....	51
Figura 5.2.1.5 Ecuación utilizada en la calibración	51

Figura 5.2.1.6. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales del diagnóstico RMC	52
Figura 5.2.1.7. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales del diagnóstico ECE	52
Figura 5.2.1.8. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales de los diagnósticos RMC y ECE superpuestos.....	53
Figura 5.2.2.1. Lectura de los datos de R y Z y posterior obtención de rho poloidal	53
Figura 5.2.2.2. Valores de rho poloidal para los diferentes canales del diagnóstico CEC	54
Figura 5.2.2.3. Ordenación de los canales y valores según rho poloidal de menor a mayor	55
Figura 5.2.2.4. Representación de la temperatura electrónica en función de rho poloidal para los diagnósticos RMC y ECE superpuestos	56
Figura 5.2.2.5. Comprobación de los canales canales asignados según rho poloidal mediante el uso de la herramienta Diaggeom	57
Figura 5.2.2.6. Eliminación de los canales “rotos” o con fallo de medida	57
Figura 5.2.2.7. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales de los diagnósticos RMC y ECE superpuestos, una vez eliminado los canales que fallaban.....	58
Figura 5.2.2.8. Representación de la temperatura electrónica en función de rho poloidal de los diagnósticos RMC y ECE superpuestos, una vez eliminado los canales que fallaban.....	59
Figura 5.2.3.1. Realización de la transformada de Fourier.....	59
Figura 5.2.3.2. Elección de rangos de frecuencia y rho a representar	60
Figura 5.2.3.3. Elección de escala a representar (logarítmica, lineal, raíz)	61
Figura 5.2.3.4. Representación de la FFT de temperatura en escala logarítmica (Multipow)	62
Figura 5.2.3.5. Representación de la FFT de temperatura en escala lineal (Multipow).....	62
Figura 5.2.3.6. Representación de la FFT de temperatura en escala de raíz cuadrada (Multipow)	63
Figura 5.2.3.7. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.....	64
Figura 5.2.3.8. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, dónde se representa la evolución de la temperatura para distintas frecuencias en el tiempo.....	65
Figura 5.2.3.9. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle	65
Figura 5.2.3.10. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.....	66
Figura 5.2.3.11. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, dónde se representa la evolución de la temperatura para distintas frecuencias en el tiempo.....	67
Figura 5.2.3.12. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle	67
Figura 5.2.3.13. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.....	68
Figura 5.2.3.14. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, dónde se representa la evolución de la temperatura para distintas frecuencias en el tiempo.....	69
Figura 5.2.3.15. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle	69
Figura 5.2.3.16. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.....	70

Notación

Fe	Átomo de Hierro
${}^4_2\text{He}$	Átomo de Helio
m	Masa
c	Velocidad de la luz
K	Kelvin
MeV	Mega-electronvoltio
${}^2_1\text{H}$	Átomo de Deuterio
${}^3_1\text{H}$	Átomo de Tritio
keV	Kilo-electronvoltio
n	Densidad del plasma
τ	Tiempo de duración del plasma
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
DEMO	DEMONstration Power Station
ASDEX	Axially Symmetric Divertor Experiment
JET	Joint European Torus
RAF	Royal Air Force
T	Tesla
MA	Mega-amperio
ρ	Rho poloidal

MW	Mega-watio
Q	Ratio de energía entrante y saliente de un reactor
IPP	Max-Planck Institute of Plasma Physics
m ³	Metros cúbicos
P	Potencia de calentamiento
GPS	Slobal Positioning System
k	Constante de Boltzmann
ϵ_α	Energía de las partículas alfa desprendida
C ₁	Constante de Bremsstrahlungs
Z _{eff}	Carga efectiva del plasma
e	Carga del electrón
n _e	Densidad de electrones en el plasma
Δx	Separación entre cargas
ϵ_0	Energía de las partículas del plasma
E	Campo eléctrico
f _p	Frecuencia del plasma
λ_d	Longitud de Debye
V _a	Velocidad de las ondas de Alfvén
R	Radio mayor
q _{min}	Valor mínimo del factor de seguridad
r _L	Radio de Larmor
B	Campo magnético
μm	Micrómetro
mm	Milímetro
f _c	Frecuencia de resonancia del ciclotrón
J	Julio (unidad de energía)
ω_c	Velocidad angular del ciclotrón
q	Carga de la partícula
v _⊥	Velocidad perpendicular al campo magnético

σ	Sección eficaz de fusión
RSAE	Reversal Shear Alfvén Eigenmodes
TAE	Toroidal Alfvén Eigenmodes
q	Factor de seguridad (ecuación 4.7)
R	Componente radial del reactor
Z	Componente vertical del reactor
MHD	Magnetohydrodynamics
ECE	Electron Cyclotron Emission
KHz	Kilo-hercio
GHz	Giga-hercio
ISIS	Interactive Shotfile Information System
FFT	Fast Fourier Transform

1 INTRODUCCIÓN

“Vivimos en la Tierra como si tuviéramos otra a la que ir”

Terry Swearingen

Desde los inicios de la vida en nuestro planeta, tanto los organismos más antiguos y sencillos, como los más modernos y complejos, han necesitado y necesitan energía para satisfacer una serie de demandas vitales e imprescindibles. En el caso concreto del ser humano, dicha energía es obtenida mediante el procesamiento de los alimentos, la respiración y la luz y calor que el Sol emite día tras día.

Sin embargo, a medida que las civilizaciones han ido creciendo y evolucionando, se han creado nuevas necesidades energéticas, cada vez más esenciales.

La primera fuente de energía para el bienestar y evolución de la especie fue el dominio del fuego, el cual se obtenía mediante la quema de combustible como la madera. Éste permitía cocinar los alimentos y proveerse de calor en climas fríos. Desde este punto, el hombre ha seguido evolucionando y abriendo nuevos campos para la obtención de energía. La quema del carbón en los principios de la era industrial, la utilización de electricidad para iluminar los hogares o el uso del petróleo para mover el automóvil no son más que varios ejemplos de éste avance.

Aunque la mayoría de las necesidades energéticas mencionadas no son necesarias para la supervivencia del ser humano, se han convertido en parte casi inseparable de la vida cotidiana del mismo. No somos capaces de imaginar un mundo sin todas estas comodidades y como único objetivo el de sobrevivir. Aunque esta incapacidad para imaginarnos un mundo así nos hace pensar que estas fuentes no tienen fin, muchas de las fuentes energéticas utilizadas actualmente tienen una duración limitada, siendo el petróleo el caso más preocupante. A esto hay que sumarle que la utilización del petróleo, el carbón y otros combustibles fósiles para su quema y correspondiente obtención de energía, hace que aumenten los niveles de compuestos de carbono en la atmósfera (figura 1.1).



Figura 1.1. Industria expulsando CO₂ y otros compuestos a la atmósfera (1)

El aumento desmesurado de estos compuestos es el causante del conocido efecto invernadero, uno de los principales problemas medioambientales en la actualidad. Éste da lugar a un aumento con el tiempo de la temperatura global del planeta, produciendo en el clima cambios perjudiciales para la vida, entre los que se incluyen el derretimiento de los polos (figura 1.2) o aparición de nuevas zonas secas. Por estos motivos, en los últimos años se tiende a estabilizar el consumo de este tipo de combustibles, a la vez que se buscan nuevas fuentes de obtener energía para su consumo, entre las que destacan las renovables, como la eólica o la mareomotriz, o la energía nuclear.



Figura 1.2. Deshielo de los polos y especies que lo sufren (2)

La aparición de nuevas tecnologías hace posible satisfacer el aumento de las necesidades energéticas globales sin recurrir a un abuso excesivo de los combustibles fósiles. Y sí, al aumento, ya que el consumo energético global aumenta de forma exponencial año tras año. ^[1] Como se puede ver en la figura 1.3, a pesar del desarrollo de energías limpias, con el paso de los años sigue aumentando la utilización de carbón y petróleo como fuentes de energía. Esto se debe a lo comentado anteriormente, y sí, es verdad que cada vez se produce mayor cantidad de energía limpia o renovable, pero a su vez el consumo total aumenta, explotando también más los combustibles fósiles.

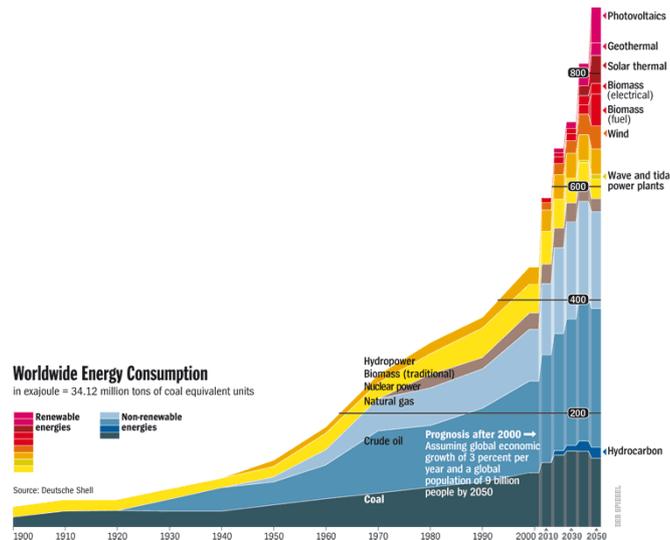


Figura 1.3. Evolución del consumo de energía mundial a lo largo de los años (3)

Entre las energías alternativas a los combustibles fósiles citadas se encuentra la energía nuclear. La energía nuclear más conocida es la producida por fisión en grandes reactores nucleares. Este tipo de energía, aunque no produce un aumento notorio del efecto invernadero como lo hace el uso de combustibles fósiles, posee mala fama debido a los altos niveles de radiactividad involucrados en su uso y a la compleja gestión de los residuos radiactivos producidos (figura 1.4). Por esta razón, existe la tendencia, entre las personas inclinadas a conservar la ecología del planeta, a considerar que la energía nuclear no puede contemplarse como una fuente alternativa viable para el futuro.



Figura 1.4. Desechos radioactivos de una central nuclear (4)

Sin embargo, aunque desconocida para muchos, existe otra fuente de energía nuclear más prometedora para el futuro que la que acabamos de mencionar. Se trata de la energía de fusión nuclear, la cual tiene un potencial energético mayor que la fisión. La principal ventaja presente sobre la fisión es que no produce productos radiactivos, considerándose así una energía nuclear limpia.

Aunque aún no existen reactores que produzcan energía de fusión de forma económicamente viable, si se ha posicionado potencialmente como la principal fuente de explotación de energía para un futuro no muy lejano. Por ello, estudios internacionales sobre este campo son realizados día tras día en reactores experimentales de todo el mundo, obteniendo datos e información para seguir avanzando. La gran cantidad de energía que puede facilitar esta tecnología promete ser una de las principales soluciones a la desmesurada utilización de los combustibles fósiles, a la vez que un sustituto limpio de la hasta ahora energía nuclear.

El objetivo del proyecto es ofrecer una primera toma de contacto, tanto teórica como práctica, de este prometedor método de obtener energía, comenzando desde los principios básicos de estas reacciones y las dificultades para su desarrollo, hasta centrarnos en los reactores en los que se investigan a día de hoy, acabando con el desarrollo de la herramienta Multipow, a partir de la cual se pueden observar con facilidad las características del plasma del interior de los reactores.

El capítulo 2 comienza con la explicación de la física básica sobre la fusión. En él se aclararán temas como de dónde se produce la energía al unir átomos y que se necesita para producir esta unión. Le seguirá una comparación básica con la fisión sobre la energía que produce cada una, sus residuos... Tras ello, se dará paso a la última parte del capítulo, donde se mostrará que estas reacciones se han observado en las estrellas, y se han replicado aquí a través de distintos tipos de confinamiento, finalizando con el magnético, motivo de estudio en el siguiente capítulo.

El capítulo 3 comienza con los conceptos básicos sobre los reactores de confinamiento magnético, dividiendo luego este tipo de reactores en dos: Tokamak y Stellarator. De cada uno de ellos se describirán sus características principales y los principales reactores en el mundo.

En el capítulo 4 se aclararán una serie de conceptos sobre el plasma en el interior de los reactores, tanto su física básica como los movimientos que realizan sus partículas en función de los campos magnéticos. Para finalizar, se introducirá el concepto de modo de vibración del plasma, así como diagnósticos para su estudio.

Por último, el capítulo 5 se centra en la programación de la herramienta de análisis Multipow, a partir de la cual se pueden observar los modos de vibración del plasma. Comenzará con una descripción de las herramientas utilizadas para su realización, seguida de la explicación del código paso a paso y de varios resultados obtenidos.

2 FUSIÓN NUCLEAR, PRINCIPIOS BÁSICOS

*"Quedarse en lo conocido por miedo a lo desconocido,
equivale a mantenerse con vida pero no vivir."*

Anónimo

Como su propio nombre indica, la fusión nuclear es un proceso de unión de dos núcleos atómicos para formar uno solo, liberándose en dicho proceso gran cantidad de energía. Durante la fusión nuclear, los nucleones de cada átomo (protones y neutrones) se unen debido a la fuerza nuclear fuerte, una de las cuatro grandes fuerzas que, según los modelos más aceptados actualmente, rigen el universo. Esta se caracteriza por ser extremadamente intensa, aunque solo se manifiesta cuando los nucleones se encuentran a distancias muy pequeñas.

[2] Cuando un nucleón se encuentra rodeado de otros nucleones siente una fuerza neta correspondiente a la suma de fuerzas (repulsión coulombiana, fuerza nuclear fuerte...) que producen sobre él cada nucleón por separado. Ésta fuerza neta se corresponde con la fuerza necesaria para separar dicho nucleón del resto. En este sentido se define la energía de enlace como la energía necesaria para separar los nucleones de un núcleo atómico. Al ser la fuerza nuclear fuerte tan intensa, y venir provocada por la interacción cercana de nucleones entre sí, la energía de enlace aumentará a medida que aumente el número de partículas en el núcleo del átomo. Este comportamiento puede observarse en la figura 2.1, en la que se muestra la relación entre la energía de enlace por nucleón (eje y) con respecto al número de nucleones o número másico de los distintos átomos (eje x).

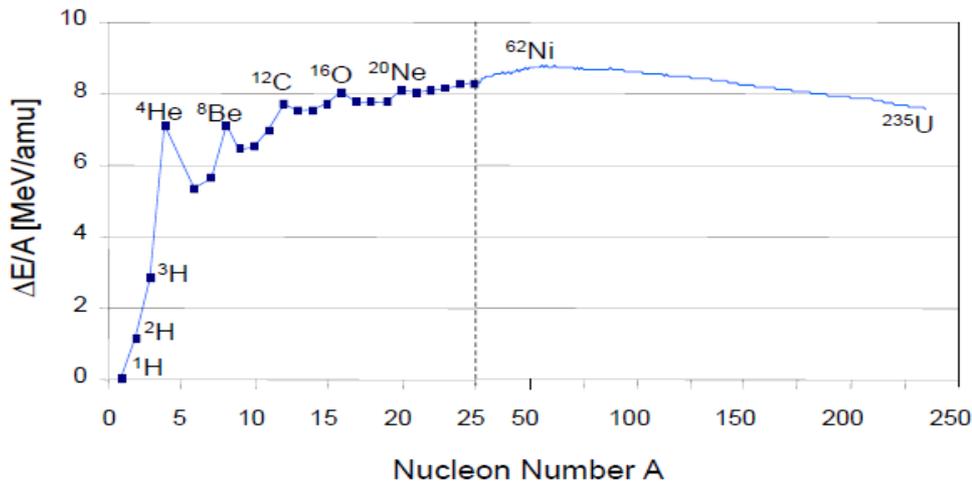


Figura 2.1. Energía de enlace por nucleón con respecto al número de nucleones totales (5)

Al ir aumentando el número de nucleones, existe una tendencia a ir aumentando la energía de enlace que se produce entre ellos. Éste aumento supone una mejora en cuanto a la estabilidad en el núcleo, ya que la energía que aparece entre ellos es mayor. Sin embargo, en átomos con un número másico mayor al del hierro (Fe), existe una tendencia a disminuir la energía de enlace por nucleón al aumentar más y más el número de nucleones. Esto se debe a que, al ser la fuerza nuclear fuerte una fuerza que se manifiesta a distancias muy pequeñas, al haber más y más nucleones, esta fuerza no aumenta en gran medida, ya que la distancia entre los nucleones disminuye. Sin embargo la fuerza de repulsión coulombiana aumentará a medida que aumentan los protones en el núcleo, lo que explica la disminución de la energía de enlace al aumentar la masa nuclear.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se puede deducir que al unir dos núcleos de elementos muy ligeros, el resultado será un núcleo atómico de mayor masa y estabilidad. Este aumento en la estabilidad se manifiesta con la expulsión de energía en forma de energía cinética del núcleo final, junto con la emisión de partículas por parte del mismo. En éste principio se basa la fusión termonuclear, la unión de átomos ligeros para producir energía en el proceso, debido al comportamiento explicado anteriormente. Cabe destacar que la liberación de energía por fisión nuclear se da en elementos pesados (a la derecha de la gráfica) y se rige por el mismo principio. Al dividir el núcleo de un elemento pesado en dos partes menores con mayor estabilidad se produce una expulsión de energía de igual forma que con la fusión. Esta energía es la que aprovechan las centrales nucleares.

El mecanismo de liberación de energía comentado anteriormente puede ser también entendido desde un punto de vista distinto, pero relacionado al anterior. Si observamos las masas de los núcleos de los distintos átomos, descubrimos que ésta no coincide con la suma de las masas de sus constituyentes. Por ejemplo, la masa de un núcleo de helio (${}^4_2\text{He}$), formado por dos protones y dos neutrones, es menor que si se sumaran las masas individuales de los dos protones y los dos neutrones que lo forman. La diferencia de las masas se debe a que se ha empleado parte de dichas masas, en este caso, en forma de energía para unir a los nucleones, es decir, para aumentar la estabilidad citada anteriormente. Ésta energía proporcional a la masa transformada se puede obtener de la famosa equivalencia de masa y energía que encontró Einstein en la teoría de la relatividad (figura 2.2):

$$E = mc^2$$

Figura 2.2. Relación entre la masa y la energía, ecuación de Einstein (6)

Dónde “m” es la masa del núcleo y “c” es la velocidad de la luz, la cual equivale a $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Como se puede observar, una pequeña diferencia de masas entre unos núcleos atómicos y otros, puede dar lugar a una liberación de energía desmesuradamente alta, al ser la velocidad de la luz tan elevada. Por este principio se puede calcular la energía que se liberará en un proceso nuclear, ya sea fusión o fisión.

[2] Una vez conocida la forma en la que se libera la energía en la reacción de fusión nuclear, resulta interesante conocer cómo se puede lograr este proceso, ya que no se suele dar de forma espontánea. Como se ha citado anteriormente, los nucleones ejercen una serie de fuerzas entre ellos, tanto de repulsión coulombiana como de unión nuclear fuerte. Ésta última destaca únicamente a distancias cortas, pero cuando aparece supera con creces a la repulsión eléctrica entre protones (razón por la cual existen los distintos átomos y sus estructuras nucleares son estables).

Teniendo en cuenta este principio, al acercar dos núcleos atómicos para lograr la fusión nuclear, habrá que suministrarles la energía necesaria como para superar las fuerzas de repulsión de Coulomb que en ellos aparece, hasta el punto en el que sea tan pequeña la distancia entre ellos como para que comience a destacar la fuerza nuclear fuerte. Por lo tanto, para lograr la fusión hay que aplicarle gran cantidad de energía cinética a los núcleos. Esta cantidad de energía mínima necesaria coincide con la altura máxima de la barrera de Coulomb, mostrada en la figura 2.3.

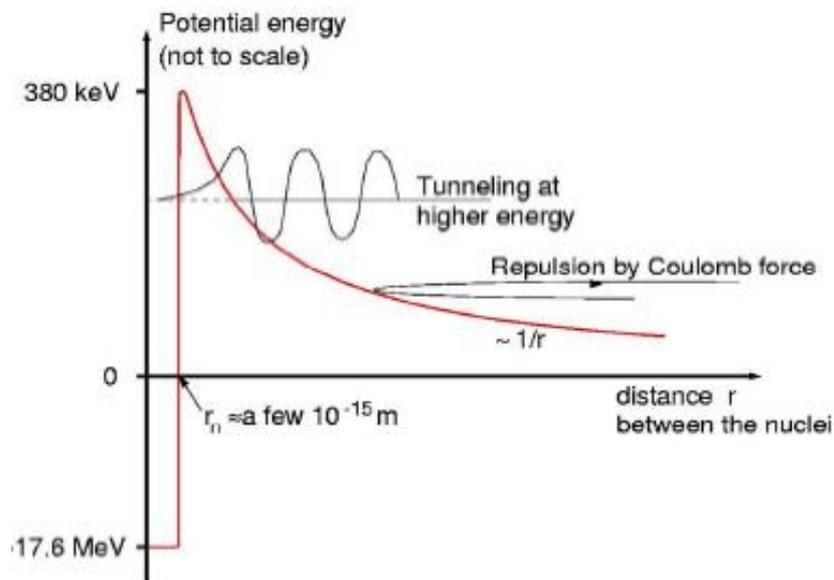


Figura 2.3. Barrera de Coulomb (7)

En ella se muestra una superposición entre la repulsión coulombiana y la atracción debida a la fuerza nuclear fuerte, representando en el eje x la distancia entre los núcleos a unir y en el eje y las energías potenciales en las distintas posiciones. A medida que los átomos se acercan, las energías potenciales son mayores, ya que mayor es la repulsión eléctrica entre ellos. Sin embargo, en el punto donde se alcanza el máximo valor, comienza una bajada muy pronunciada debido a la presencia de las interacciones nucleares. Este punto máximo de energía es el mínimo necesario para lograr que dichas fuerzas nucleares actúen uniendo los núcleos. Sin embargo, no es absolutamente necesario alcanzar dicha energía para que los nucleones se unan. Esto se debe a un efecto cuántico que se conoce como efecto túnel (figura 2.4.). A escalas subatómicas las leyes clásicas de la física no son aplicables, siendo reemplazadas por la llamada mecánica cuántica, la cual determina no un resultado exacto, sino una probabilidad. Como consecuencia, al lanzar varios núcleos entre sí existe una probabilidad de que, aún sin alcanzar la energía necesaria para superar la barrera de Coulomb, se produzca el desplazamiento de dichas partículas a un lugar de menor energía y, por tanto, sea posible la fusión. Esto hace más probable la obtención de la misma, ya que disminuye el nivel de energía necesario al inicio. Este efecto permite que, tanto natural como artificialmente, se logre obtener energía de la unión de núcleos atómicos.

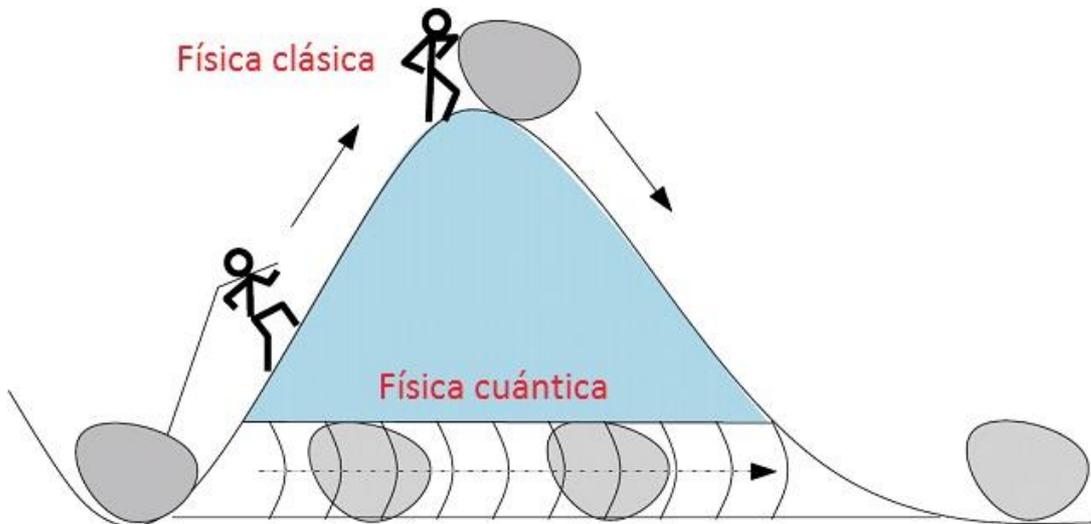


Figura 2.4. Animación sobre el efecto túnel (8)

2.1. Comparación entre fusión y fisión nuclear

[3] Una vez sentadas las bases sobre la fusión nuclear, es útil mostrar una comparativa frente a la energía de fisión nuclear, al ser la única fuente actual de explotación de este tipo de energía.

Como se ha mencionado en la introducción a este ensayo, el principal problema de la fisión nuclear reside en su peligrosidad. El uso de este tipo de técnicas deriva en una gran cantidad de residuos nucleares, muy perjudiciales para medio ambiente. Esta serie de residuos son almacenados en plantas subterráneas hasta que se reduzca su radiactividad, como de observa en la figura 2.1.1. Sin embargo, esto no ocurre en un período corto de tiempo, si no en varios años o décadas. Dejando a un lado los residuos, este tipo de centrales son menos controlables en caso de accidente. Aunque ambas reacciones basan la producción de energía en reacciones en cadena, es más rápida la detención de un reactor de fusión, ya que es posible parar de introducir combustibles, al contrario que en las plantas de fisión nuclear, donde el combustible reposa en el núcleo del reactor, sin posibilidad de extraerlo. Además, en caso de accidente, la radiación emitida por una planta de fusión nuclear sería bastante menor que en una de fisión. Ésta afectaría únicamente a zonas cercanas a la planta, mientras que la otra puede desembocar en catástrofes internacionales, como Fukushima o Chernobyl.



Figura 2.1.1. Almacén subterráneo de residuos nucleares (9)

En cuanto a la energía que producen, la energía de fusión es capaz de superar en 3 o 4 veces a la energía obtenida mediante la fisión de núcleos. Esto se debe a que la energía que se obtiene de la fusión nuclear proviene tanto de la fuerza nuclear fuerte como de la débil, mientras que la de fisión únicamente de la fuerte. Además la energía liberada en la fusión puede ser utilizada directamente para alimentar al reactor, por lo que además puede ser aprovechada de una forma más directa. Sin embargo, es importante decir que se necesita unas energías mayores para llegar al proceso de fusión que al de fisión, por lo tanto el gasto energético es mayor en la primera.

En cuanto al coste de una u otra tecnología, al ser la fusión una tecnología aun por desarrollar, resulta complicado hacer una estimación. Sin embargo, sabemos que el coste de combustible de la fisión (Uranio 235) es alto por su escasez, a lo que se une un complicado proceso de enriquecimiento necesario para su utilización y el complejo tratamiento de sus residuos. En cambio, la fusión nuclear utiliza combustibles mucho más comunes, como son el deuterio (existen grandes cantidades en los océanos) y el tritio (el cual se puede obtener del litio), siendo esto un aliciente a que, en unos años, llegue a ser una tecnología más barata que la actual.

Es fácil percatarse de las innumerables ventajas que posee la fusión frente a la actual fisión. Al ser una tecnología mucho más segura y con menos contaminantes sería apoyada por un gran número de ciudadanos, al contrario que la fisión, la cual es muy criticada. Sumando su mayor producción de energía y su bajo coste en combustible, la fusión se coloca como una energía imprescindible en el futuro, entendiendo la necesidad de controlarla cuanto antes.

2.2. Fusión nuclear en la naturaleza y en el laboratorio

[4] Hasta ahora únicamente se ha hablado sobre los conceptos básicos de la física que hay detrás de la fusión nuclear. Una energía capaz de satisfacer las necesidades energéticas futuras. Una energía ¿nueva? Quizás suene poético, pero la misma energía que puede ayudarnos en el futuro, lleva acompañándonos durante miles de millones años, en el corazón de las estrellas, y por supuesto en nuestro Sol (figura 2.2.1.). Y sí, la energía con la que nos iluminan y nos atraen en el cielo nocturno es producida por violentos procesos de fusión nuclear en su interior.

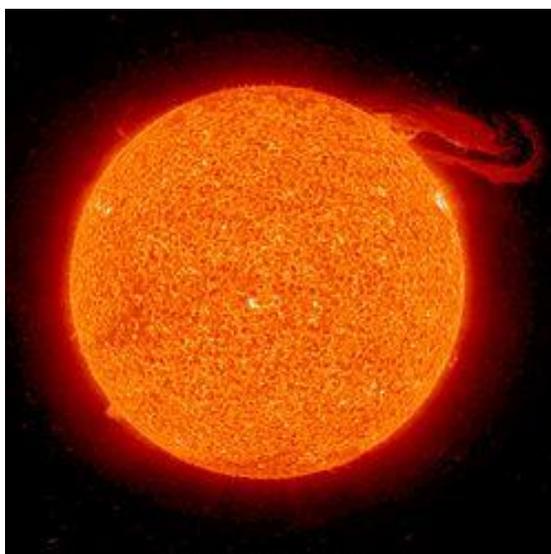


Figura 2.2.1. El Sol (10)

Aproximadamente el 90% de la energía producida en las estrellas procede de las reacciones de fusión del hidrógeno para convertirlo en helio. Sin embargo, estas reacciones no son iguales en todos los casos, sino que dependen de las características de la estrella. Se pueden diferenciar dos reacciones:

- Una de ellas es la cadena protón-protón. Es el proceso de fusión nuclear que alimenta al Sol y otras estrellas de igual o menor tamaño, cuya temperatura del núcleo es menor de 15 millones de grados Kelvin (K). El ciclo de reacción produce unos 25 MeV de energía. Se trata de un proceso largo, del orden de 10^9 años, aunque suficiente para sostener a las estrellas y seguir produciendo energía debido a la gran cantidad de hidrogeno que en ellas se encuentra. En la figura 2.2.2 se muestra de forma esquemática la evolución de los núcleos durante el proceso.

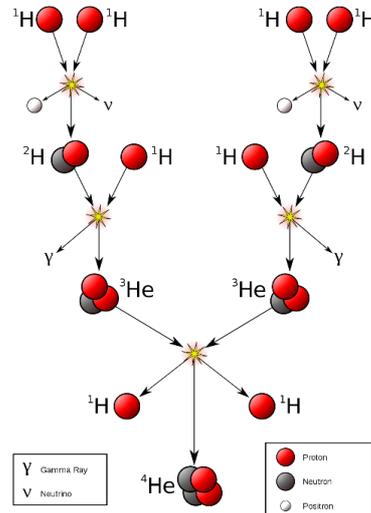


Figura 2.2.2. Cadena protón-protón (11)

- La segunda de las reacciones nucleares más comunes en las estrellas consiste en el ciclo de fusión del carbono, o ciclo CON. Este tipo de reacciones se dan en estrellas por lo general más masivas que el Sol, con temperaturas centrales superiores a 15 millones de grados Kelvin. El ciclo del carbono produce 26,72 MeV por núcleo de helio. A continuación se muestra en la figura 2.2.3 una imagen dónde se resume de forma esquemática las reacciones que en el ciclo se suceden.

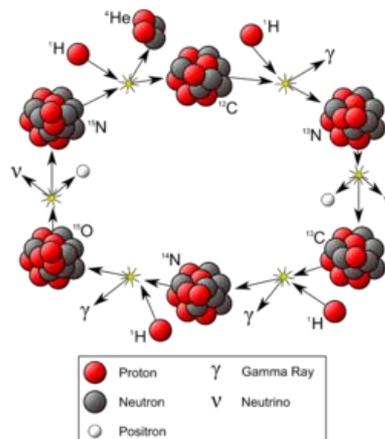


Figura 2.2.3. Ciclo del carbono (12)

Para lograr estos distintos tipos de reacciones de fusión termonucleares es necesario, como se ha mencionado anteriormente, aproximar dos núcleos atómicos tan cerca como para superar la barrera de coulomb, empezando a aparecer las fuerzas nucleares fuertes. Tanto el Sol como las demás estrellas que pueblan el universo consiguen este acercamiento debido a las altas temperaturas de su núcleo y a su gran cantidad de masa alrededor del mismo. Esto es lo que se conoce como confinamiento gravitacional.

Sin embargo, no se puede replicar en el laboratorio los mecanismos de las estrellas para conseguir la fusión. Sería impensable manejar una masa equivalente a miles de planetas en nuestro pequeño lugar de estudio. Por lo tanto, debemos buscar una nueva forma de conseguir dicha fusión con una mayor probabilidad que utilizando las reacciones solares, aplicando menor cantidad de energía y a la vez que tenga un carácter más rápido de reacción.

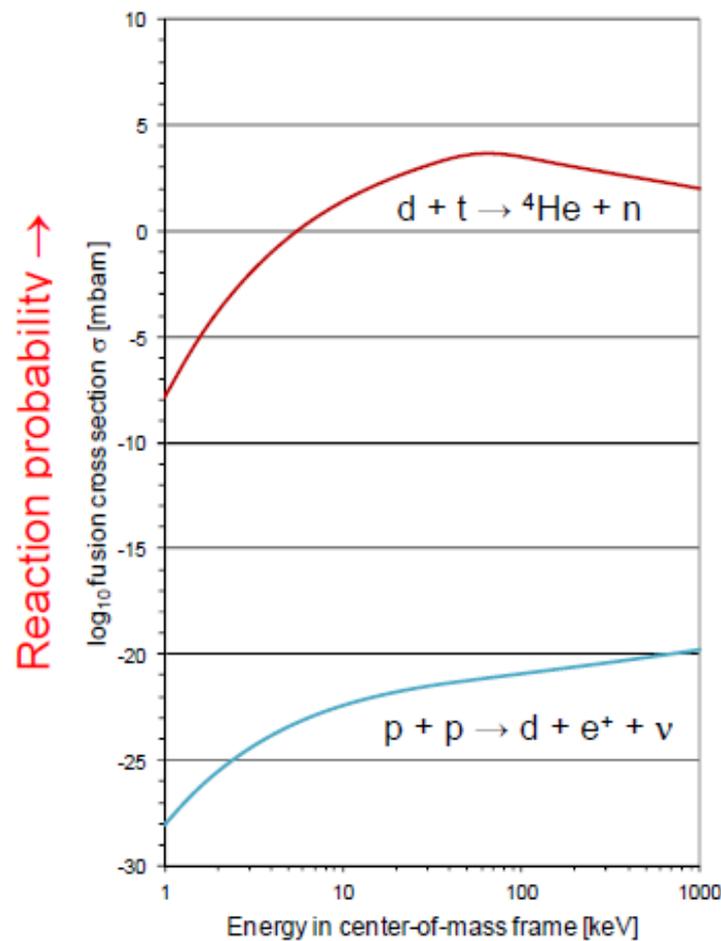


Figura 2.2.4. Probabilidad de distintas reacciones de fusión para distintos niveles de energía (13)

[2] La reacción de fusión con mayor interés hoy en día, de cara a la obtención de energía de fusión mediante confinamiento magnético, es la reacción entre núcleos de deuterio (H_1^2) y de tritio (H_1^3). Según el estudio probabilístico de secciones eficaces y los valores energéticos que hay que aportar para desarrollar una reacción nuclear, esta solución es la más asequible, como se observa en la figura 2.2.4. El deuterio se encuentra en grandes cantidades en los océanos del planeta y el tritio es posible obtenerlo a partir de una separación de los nucleones del litio, material cuyas reservas son suficientes como para no tener que preocuparse por su abasto. El resultado de dicha fusión sería un núcleo de helio (He_2^4) más un neutrón. Este neutrón se aprovecha para aportar energía al litio y obtener más tritio para continuar la reacción, como puede observarse en la figura 2.2.5.

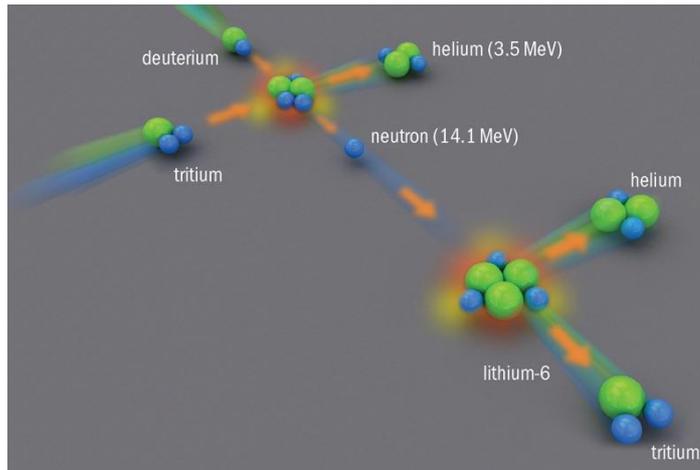


Figura 2.2.5 Representación artística de la producción de tritio en el reactor (14)

Se define como reacciones más o menos probables a aquellas que poseen una mayor sección eficaz, siendo ésta el rango de superficie entre partículas en el que se pueden dar reacciones de fusión, para una energía de excitación lo más baja posible. Para el caso de deuterio y tritio se dan secciones eficaces positivas a energías más bajas que las demás, como se puede ver en la figura 2.2.6, afianzándola como la mejor opción.

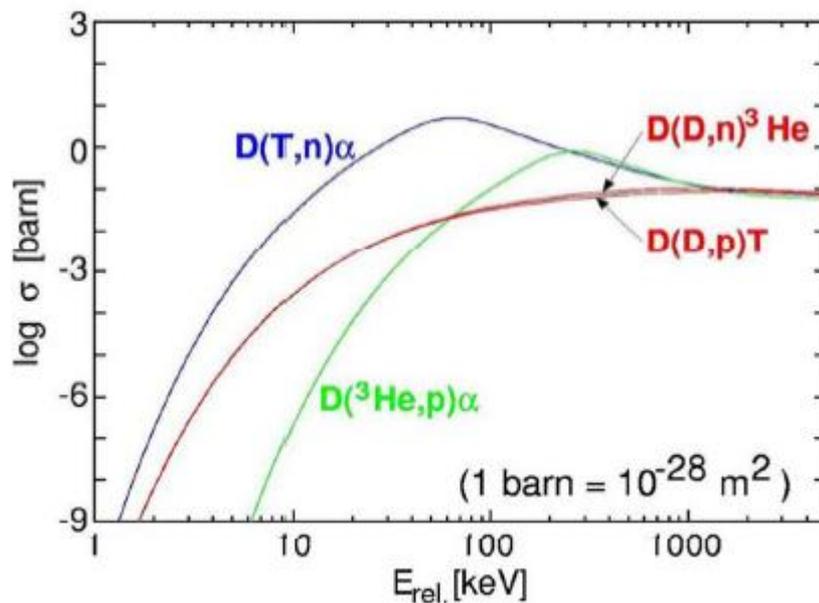


Figura 2.2.6. Sección eficaz de distintas reacciones de fusión para distintos niveles de energía (15)

[2] Existen distintos métodos para conseguir la fusión en la Tierra y todos ellos comparten la necesidad de calentar el combustible a muy alta temperatura y aumentar su densidad, con la consiguiente aproximación de sus núcleos, manteniendo estas características durante un tiempo determinado. Para lograrlo, y debido a la alta temperatura involucrada en el proceso, es imprescindible confinar el combustible en el vacío, de forma que no entre en contacto con material alguno, como por ejemplo, las paredes del reactor. Entre los distintos tipos de confinamiento se encuentran:

- Confinamiento gravitacional: se produce en el núcleo de las estrellas. La gran cantidad de masa que lo rodea hace que las presiones que sufren los núcleos sean tan altas como para acercarse lo suficiente entre sí. No es un tipo de confinamiento replicable en la Tierra como se ha hablado anteriormente.
- Confinamiento inercial: consiste en dotar a las partículas del combustible de la cantidad de movimiento necesaria para que con el choque de las mismas se venza la Barrera de Coulomb y así se pueda producir la reacción nuclear de fusión. El proceso se muestra más detalladamente en la figura 2.2.7.

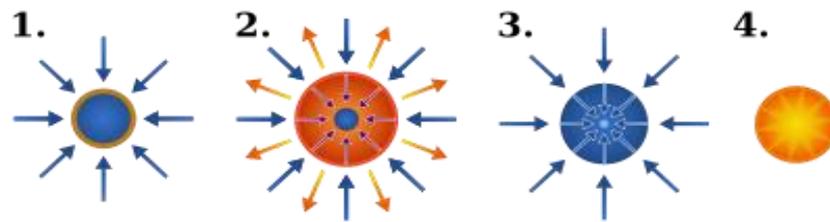


Figura 2.2.7. Proceso de confinamiento inercial (16)

- Confinamiento magnético: se basa en el confinamiento del combustible, previamente transformado en plasma, mediante potentes campos magnéticos (figura 2.2.8).

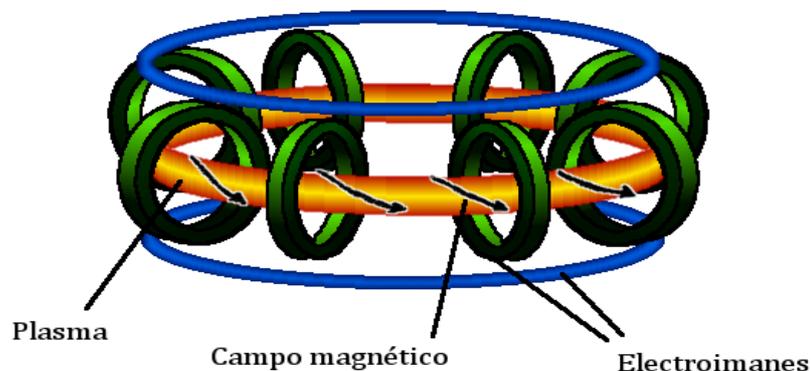


Figura 2.2.8. Representación del confinamiento magnético (17)

El proyecto se va a desarrollar en función de este último tipo de confinamiento. La mayor parte de los estudios actuales se realizan en reactores de confinamiento magnético, siendo estos los que mayor expectativas de futuro generan. El siguiente capítulo (capítulo 3) se centrará, por tanto, en este tipo de reactores, definiendo sus características, su funcionamiento y los tipos del mismo.

3 REACTORES DE FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

“El que ha llegado tan lejos que ya no se confunde, ha dejado también de trabajar”.

Max Planck

Los reactores de fusión por confinamiento magnético son los que, en la actualidad, se encuentran más desarrollados y producen unos mejores resultados, como se ha discutido en el capítulo 2. Todos los diseños se basan en el confinamiento del combustible en forma de plasma en el interior del reactor, teniendo éste forma toroidal como se observa en la figura 2.2.8. Para poder alcanzar las condiciones idóneas para la fusión, es necesario que en el interior se alcancen unas velocidades relativas entre las partículas extremadamente altas, siendo necesario además conseguir temperaturas de unos 10 keV (unos 100 millones de °K, teniendo en cuenta que 1 eV equivale a aproximadamente unos 11000 °K) durante el mayor tiempo posible. Estos factores (tiempo de confinamiento y temperatura) unidos a la densidad de partículas confinadas en el reactor son actores clave para lograr dicho objetivo con éxito.

[2] Partiendo de esta base, en 1957 John Lawson determinó las condiciones necesarias para la fusión de núcleos ligeros a partir de los tres factores mencionados anteriormente: densidad, temperatura y tiempo de confinamiento. Esta condición se conoce como criterio de Lawson (1):

$$n \cdot \tau \cdot T = \frac{12 \cdot (kT)^2}{\langle \sigma \cdot v \rangle \cdot \epsilon_0 \cdot 4 \cdot c_1 \cdot Z_{eff} \cdot (kT)^{1/2}} \quad (3-1)$$

La clave para poder alcanzar la ignición del plasma en el interior de un reactor es el triple producto entre la densidad del plasma n , la temperatura alcanzada en el confinamiento T y el tiempo de duración de dicho proceso τ , igualado éste al cociente mostrado, donde kT corresponde con la energía de las partículas (siendo k la constante de Boltzmann, a partir de la cual se pasa de Kelvin a eV) expresadas en eV (1 eV corresponde a $1,6 \times 10^{-19}$ J y siendo la constante de Boltzmann $k=1,38 \times 10^{-23}$ J/K, queda finalmente que $T = \frac{1 \text{ eV}}{k} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}} = 11000 \text{ K}$,

como ya mencionamos anteriormente), σv el coeficiente de reacción (dónde σ es la sección eficaz y v es la velocidad de las partículas), ε_α la energía de las partículas alfa desprendidas, c_I la constante de Bremsstrahlungs ($c_I=5.4 \times 10^{-37} \text{ Wm}^3\text{keV}^{-1/2}$) y Z_{eff} la carga efectiva del plasma.

El funcionamiento de los reactores de fusión por confinamiento magnético se basa en la aplicación de ciertos campos magnéticos, que permiten confinar las partículas cargadas del plasma mientras estas describen distintas trayectorias en su interior por el efecto de la Fuerza de Lorentz. Dependiendo del signo de la carga de dichas partículas, estas describían trayectorias distintas como se puede observar en la figura 3.1.

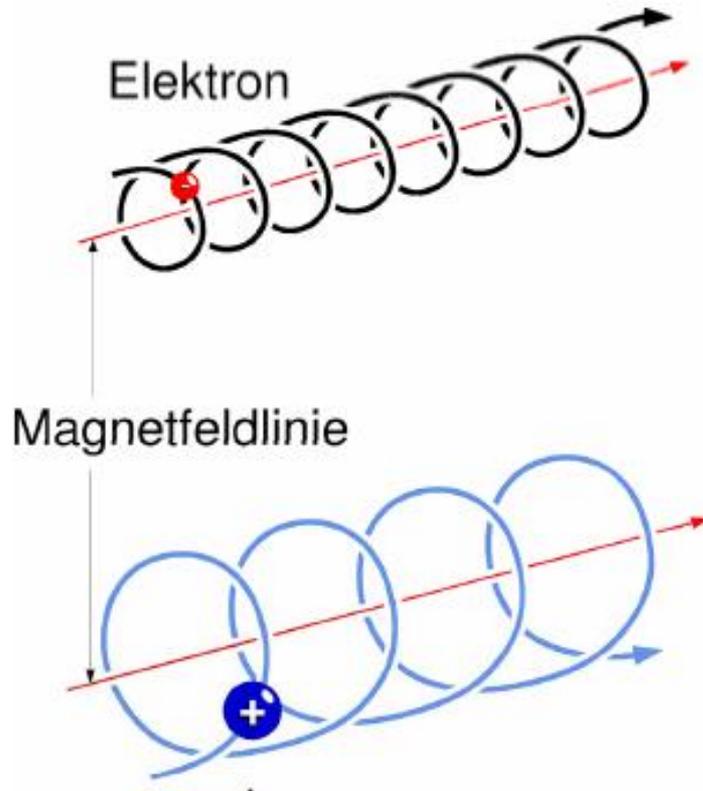


Figura 3.1. Trayectorias de iones y electrones al aplicar campo magnético (18)

Los reactores de este tipo están sometidos principalmente a la acción de dos campos magnéticos para confinar las partículas, uno toroidal y otro poloidal. Sin embargo, según la aplicación de estos campos, se pueden distinguir dos tipos principales de reactores, los Tokamak y los Stellarator, diferenciándose además en su geometría.

3.1. Reactores de fusión de tipo Tokamak

[5] El reactor de fusión nuclear de tipo Tokamak (Toroidalnaja Kamera Magnitnaja Katushka) es un diseño soviético desarrollado en Moscú durante la década de 1950. Su nombre, en inglés “Toroid Chamber Magnetic Coil”, viene dado por su peculiar forma toroidal, representada en la figura 3.1.1. En él se producen campos magnéticos debido a las bobinas colocadas alrededor del reactor. En la actualidad, la mayor parte de los reactores experimentales de fusión son de tipo Tokamak, siendo éste el modelo de futuros reactores como ITER o DEMO, de los que se hablará más adelante.

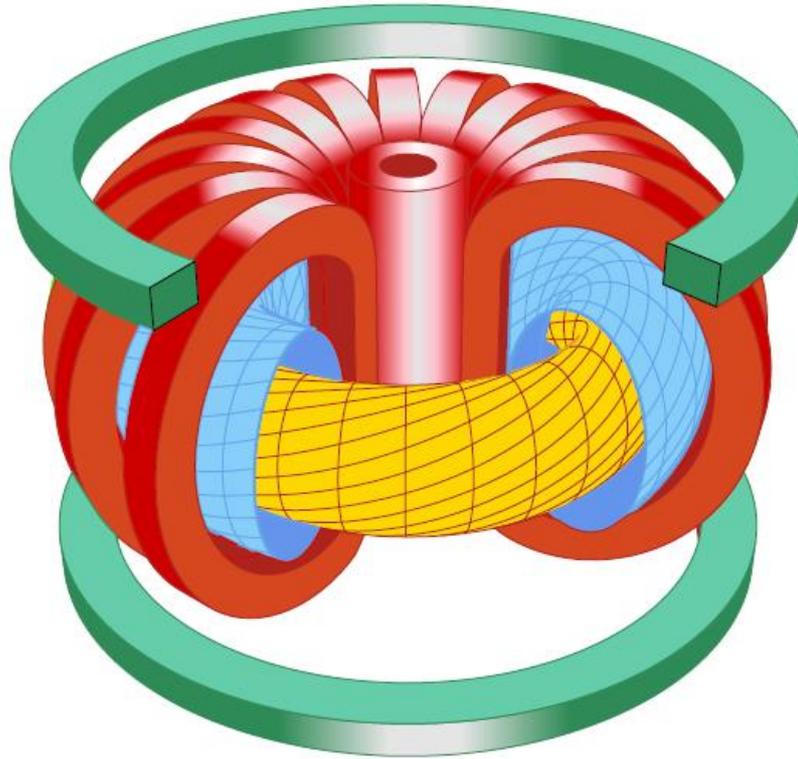


Figura 3.1.1. Representación artística de un reactor tipo Tokamak (19)

El confinamiento magnético se logra a través de dos campos magnéticos superpuestos: En primer lugar, se produce un campo en dirección toroidal, necesario para alcanzar esa estabilidad. El equilibrio toroidal que se da en este tipo de reactores se puede describir con la ecuación de Grad-Shafranov-Schlüter. Este campo es producido por bobinas externas equidistantes que rodean todo el toroide. En segundo lugar tenemos el campo magnético poloidal es producido por una corriente toroidal interna en el plasma cuyo nombre asociado es corriente de Pfirsch-Schlüter. Esta corriente es inducida mediante un solenoide central. La combinación de estos produce un confinamiento del plasma relativamente estable, todo esto mediante el “enrollamiento” de los campos magnéticos, como se observa en la figura 3.1.2. Cabe destacar que existe un tercer campo magnético de carácter estabilizador, el cual fija la posición del plasma en el toroide.

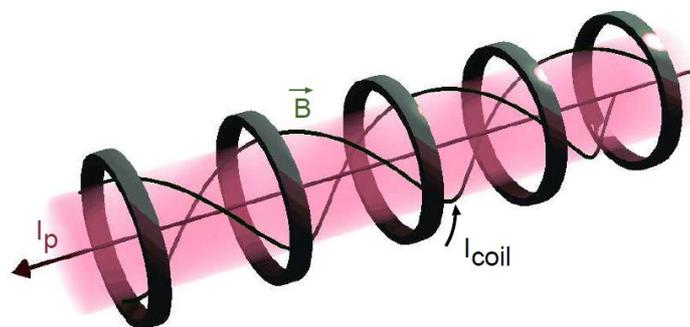


Figura 3.1.2. Enrollamiento del campo magnético (20)

La corriente que se le induce al plasma no funciona de modo continuo, sino en pulsos o durante un tiempo limitado. Con el fin de conseguir el funcionamiento en estado estacionario en una futura central eléctrica, se están realizando investigaciones sobre métodos de generación de corriente en modo continuo, como por ejemplo mediante ondas de alta frecuencia.

3.1.1 Bobinas magnéticas

[5] La mayoría de los dispositivos de fusión presentan en la actualidad bobinas magnéticas de cobre (figura 3.1.1.1). Éstas están compuestas por rieles de este material, con una anchura de unos 20 centímetros, y taladrados por distintos lugares con el objetivo del paso de agua para refrigeración de las mismas. Los devanados están aislados con bandas de fibra de vidrio y moldeados en resina sintética, otorgándole a las bobinas resistencia mecánica suficiente como para soportar las fuerzas ejercidas entre ellas, una vez que les aplica una corriente. Se estudia, en futuras centrales de fusión, utilizar para las bobinas materiales superconductores, ya que, a bajas temperaturas, la corriente es capaz de fluir sin apenas pérdidas. En ITER está previsto utilizar hilos de niobio-titanio incrustados en hilos de cobre y encerrados por una manta de acero a través de la cual circulará helio líquido a temperaturas cercanas al cero absoluto.



Figura 3.1.1.1. Siete de las 16 bobinas magnéticas principales del ASDEX durante su montaje (21)

3.1.2 Vasija del reactor

[5] Aunque el plasma se vea estabilizado por los campos magnéticos, si éste llega a contactar con el aire se extinguiría instantáneamente. Por ello, es necesario recubrir la zona donde se va a llevar a cabo la reacción. Este recipiente o vasija debe ser hermético, con condiciones de casi vacío absoluto en su interior (10^{-8} milibares). Para soportar las cargas producidas por las condiciones de baja presión en el interior y las posibles fuerzas magnéticas producidas por corrientes locales, el material a utilizar para su configuración es un acero de alta resistencia. Éste rodearía todo el reactor, formando su peculiar forma toroidal, y dejando un interior hueco donde circulará el plasma (figura 3.1.2.1.). Cabe destacar que, para la instalación de distintos diagnósticos en el interior del reactor, el recipiente requiere de numerosas aberturas, también denominadas puertos.



Figura 3.1.2.1. Trabajadores realizando labores de mantenimiento en el interior de la vasija de un reactor tipo Tokamak (ASDEX) (22)

3.1.3 Limitadores del plasma

[5] El campo magnético, que tiene por misión confinar al plasma, se extiende en todo el volumen del recipiente. En consecuencia, el plasma puede entrar en contacto con las paredes del reactor, produciéndose pérdidas de energía calorífica a través de éstas y erosionando su superficie. Para solucionar este problema y limitar la forma del plasma, los campos magnéticos están configurados para que dichas pérdidas sean transferidas a partes concretas del reactor, denominadas “colectores”, mostrados en la figura 3.1.3.1.

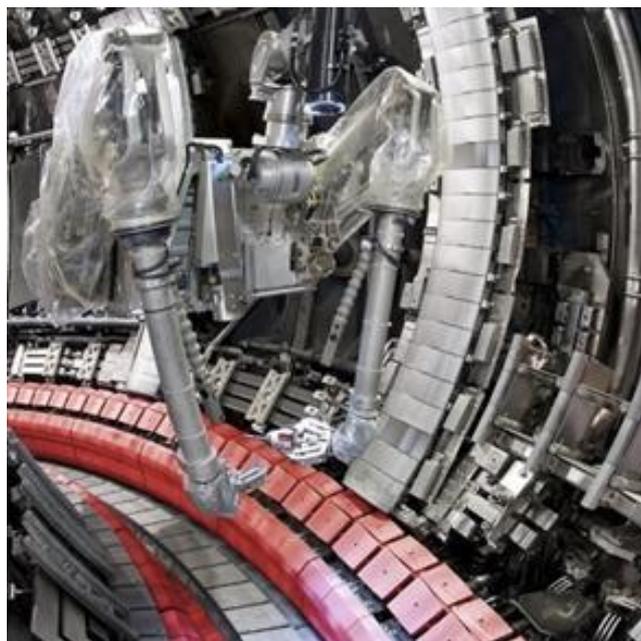


Figura 3.1.3.1. En rojo: Placas de los colectores del divertor (23)

3.1.4 Repostaje de combustible

[5] A medida que el combustible se agota, hay que seguir suministrando dicho compuesto para que no se detenga la reacción. Existen varios métodos de reabastecimiento del mismo: soplado de gas desde el borde del recipiente, inyección de partículas neutras e inyección de pellets o gránulos. En este último, el gas hidrógeno que sirve como combustible se congela en gránulos de unos pocos centímetros de diámetro. Dichos gránulos son acelerados a velocidades varias veces superiores a la del sonido mediante pistolas de gas o centrifugadoras, e inyectados en el plasma, donde se evaporan y unen al mismo para continuar la reacción, como se observa en la figura 3.1.4.1. En reactores como ASDEX, se inyectan una media de 80 gránulos cada segundo, cada uno de ellos con una masa promedio de 1 miligramo.

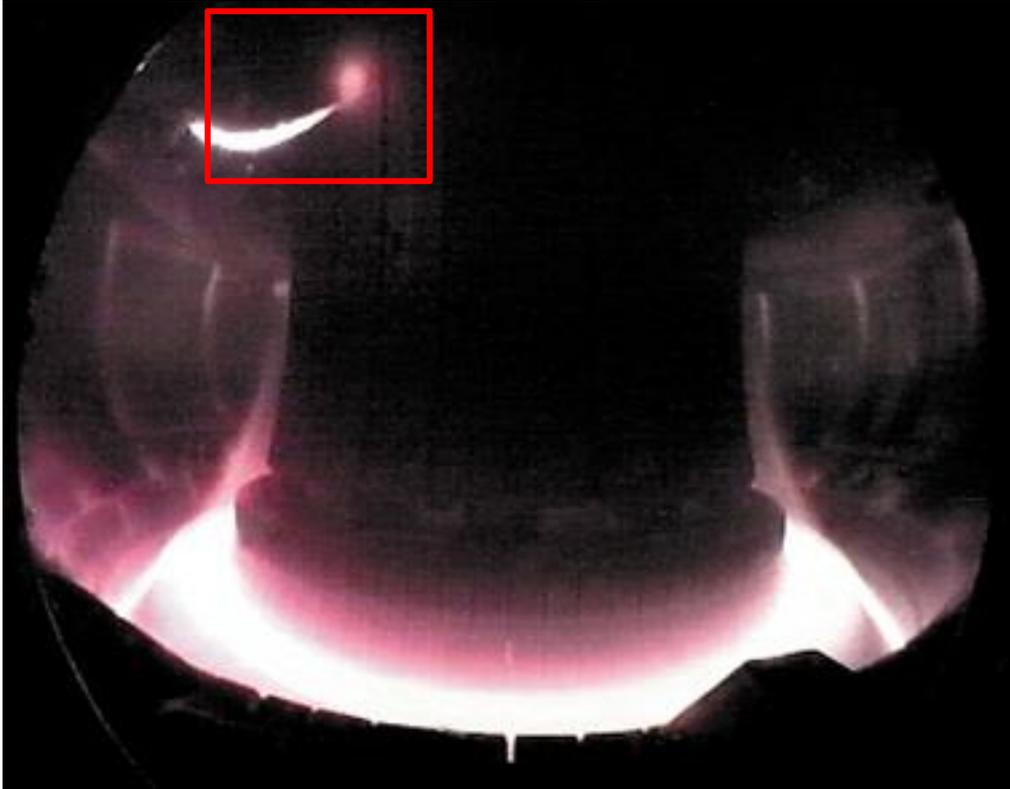


Figura 3.1.4.1. Gránulo de deuterio congelado evaporándose (cuadro rojo) (ASDEX) (24)

3.1.5 Procedimiento de descargas del reactor

[5] Al inicio, el reactor se encuentra en estado de casi vacío (10^{-8} milibares). En estos instantes es cuando se inducen los campos magnéticos externos y la corriente en la bobina del transformador central. Poco antes de la descarga es cuando se introduce el gas hidrógeno en el reactor, disminuyendo el estado de vacío a 10^{-5} milibares. Es entonces cuando se libera la corriente contenida en el transformador, produciendo un voltaje periférico y desencadenando la descarga. El hidrógeno se ioniza formándose así plasma. Durante toda la descarga, se procede a tomar los datos correspondientes a su estudio. La descarga continuará hasta que el transformador agote su corriente. En la figura 3.1.5.1 se muestra una de estas descargas. En la referencia “(25)” se puede acceder al video completo de la descarga.

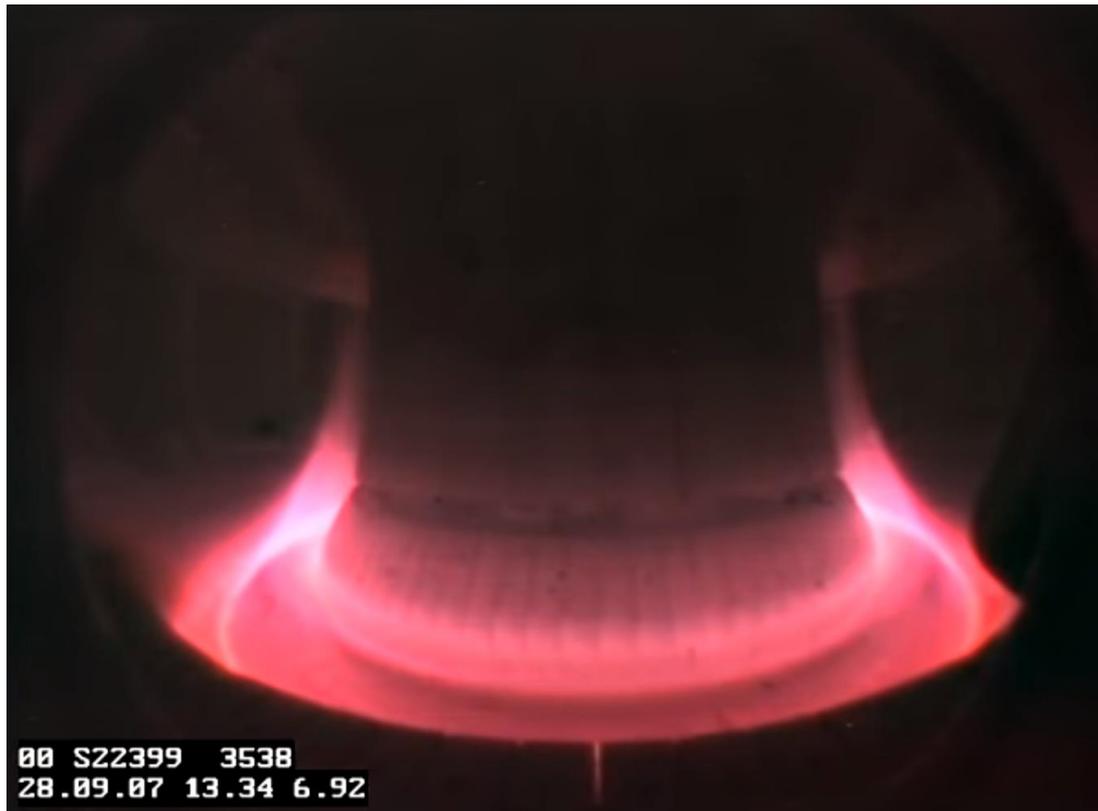


Figura 3.1.5.1. Descarga de plasma (ASDEX) (25)

3.2. Principales reactores de fusión de tipo Tokamak

Los Tokamaks son muy destacados en el panorama experimental actual por su fiabilidad y buen diseño. Así, reactores de gran importancia futura como ITER tomarán esta configuración en su diseño.

Durante su descripción en los apartados anteriores se han expuesto algunos ejemplos de reactores. A continuación hablaremos brevemente sobre los principales y más destacados reactores Tokamak en el mundo.

3.2.1. JET (Joint European Torus)

[6] El reactor Tokamak JET (figura 3.2.1.1), situado en una vieja base de la RAF (Royal Air Force) cerca de Culham, en las afueras de Oxford, en el Reino Unido, es por ahora el reactor de fusión tipo Tokamak más grande y más potente del mundo y el único capaz de operar con deuterio-tritio como combustible. Lleva en funcionamiento desde 1983, siendo el primero en llevar a cabo el experimento de fusión mantenida, y fue diseñado con el objetivo de estudiar el comportamiento del plasma en condiciones y dimensiones próximas a las del reactor de fusión de una planta de potencia.

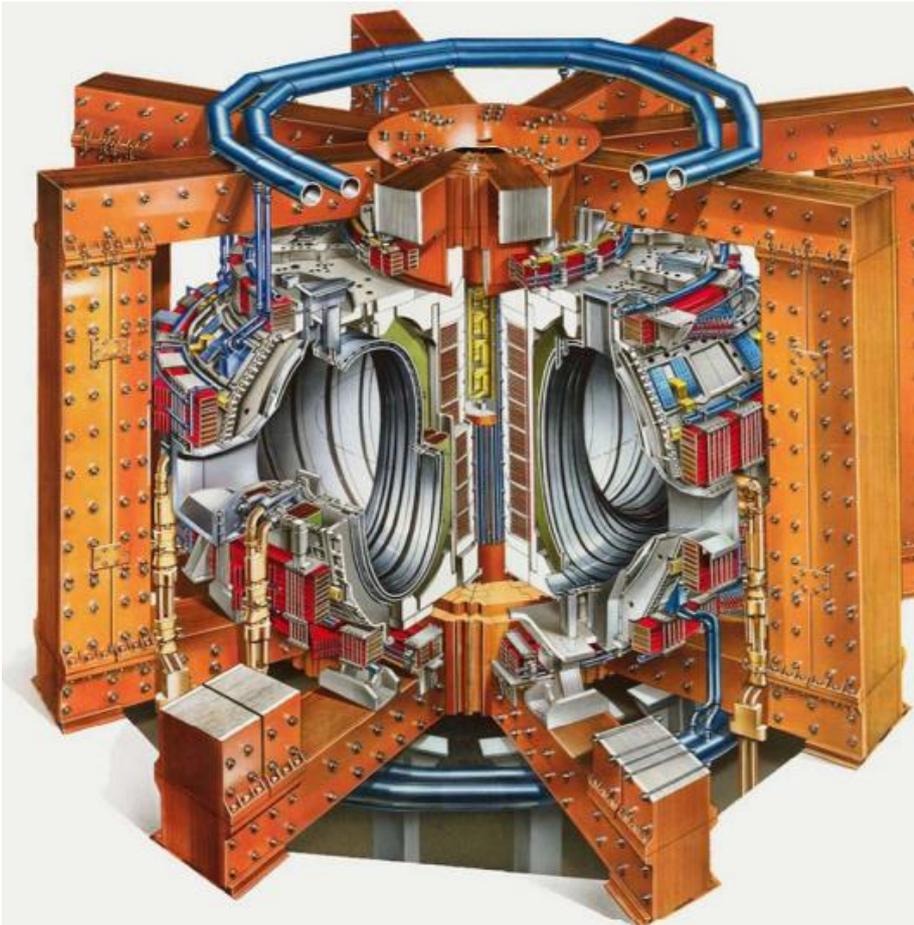


Figura 3.2.1.1 Representación artística del reactor experimental JET (26)

A pesar de ser más antiguo que los demás reactores que operan en la actualidad, JET se ha mantenido en funcionamiento gracias a su diseño robusto y flexible, a partir del cual se le han ido añadiendo modificaciones y cambios a medida que avanzaba el estudio de la fusión. En la actualidad, el principal objetivo del JET es el de sentar las bases y recoger datos para ITER, del que se hablará más adelante. Ha sido actualizado en varios aspectos con el fin de llevar a cabo dichos estudios, como por ejemplo la instalación de una pared interior hecha de berilio y tungsteno, materiales previstos para la realización de la misma en ITER.

En cuanto a sus características, los campos magnéticos aplicados para el confinamiento del plasma son bastante fuertes, de unos 4 teslas (T), mientras que las corrientes inducidas en el plasma son del orden de 5 mega-amperios (MA). En cuanto a sus dimensiones, el radio mayor y menor del toroide son 3 y 0.9 metros respectivamente, y su volumen total de unos 90 m³. Para su recogida de datos, JET lleva instalados alrededor de 100 instrumentos individuales, capturando hasta 18 gigabytes de datos por descarga de plasma.

Para finalizar cabe destacar que este reactor logró en 1991 el pico de producción de energía mediante fusión, generando 1.7 MW. En este mismo experimento se consiguió un valor de Q de 0,7 (ratio entre la energía entrante y la saliente del reactor), un gran paso en la evolución de los estudios en este campo (aunque para que sea viable y autosuficiente una planta de energía de fusión debe tener un mínimo de $Q > 1$).

3.2.2. ASDEX Upgrade (Axially Symmetric Divertor Experiment)

[7] El reactor experimental ASDEX Upgrade entró en funcionamiento en 1991. Está situado en Garching, Alemania, en el Instituto Max-Planck de física del plasma. Es el segundo reactor más grande de Alemania en la actualidad, por detrás del Stellarator Wendelstein 7-X, del que se hablará más adelante.

Su objetivo principal es, al igual que en muchos reactores en la actualidad, preparar las bases físicas y de diseño tanto de ITER como de DEMO. En la figura 3.2.2.1 se muestra una trabajadora en el interior del reactor realizando labores de mantenimiento.



Figura 3.2.2.1. Interior del ASDEX (27)

ASDEX toma su nombre de la configuración de su campo magnético. En este reactor, el campo magnético se ajusta de tal forma que se desvía el plasma de las paredes hacia unos “colectores”, los cuales eliminan las impurezas del plasma y protegen las paredes del reactor.

En cuanto a sus características, ASDEX posee un radio menor de 1.6 metros y un volumen de unos 13 m³. El campo magnético de confinamiento es producido por 16 bobinas (su sección se representa en la figura 3.2.2.2) que envuelven el toroide. Éstas producen un campo de unos 3.9 T, con una corriente en el plasma de unos 2 MA. El calentamiento del plasma se lleva a cabo mediante varios métodos, entre los que se encuentran la inyección de partículas neutras, la calefacción por alta frecuencia o el calentamiento por microondas.

Para la recogida de datos, el reactor posee unos 40 diagnósticos, con los que se toman datos de temperatura, densidad electrónica... Son capaces de recoger unos 4 gigabytes de datos por descarga. Algunos de estos diagnósticos se analizarán en el capítulo 4.

Al contrario que JET, las reacciones de fusión se producen con el uso de hidrógeno y deuterio. Para proteger de la radiactividad producida por los neutrones emitidos durante la reacción, el reactor está rodeado por unas paredes de hormigón de 2 metros de espesor, tanto por la parte superior como por los lados.

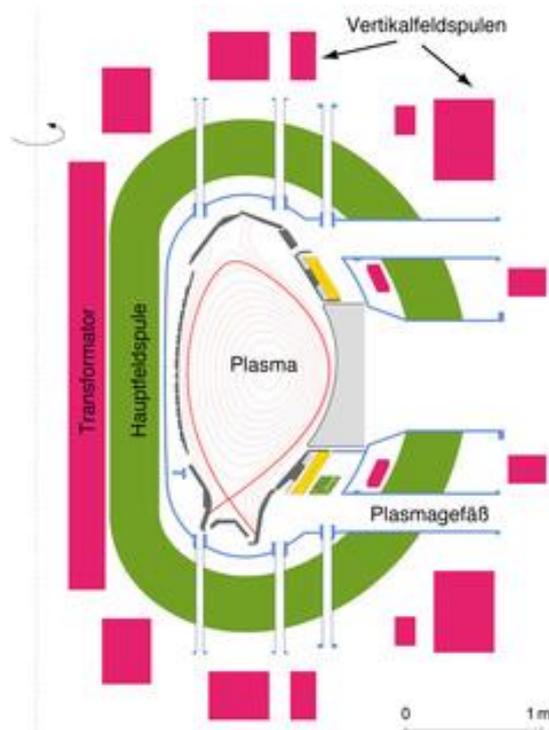


Figura 3.2.2.2. Sección transversal de ASDEX (28)

[7] ASDEX está estudiando el comportamiento del plasma al confinarlo dentro del Tokamak para describirlo numéricamente. Entre los temas tratados se incluyen los estudios sobre el divertor, la turbulencia del plasma, el transporte de partículas y energía en el plasma, pruebas de modelos teóricos, optimización de densidad y presión del plasma...

El dispositivo ASDEX es muy adecuado para este tipo de experimentos debido a sus características y estructura. Su índice de calidad es de 15 megavatios por metro cuadrado, siendo este índice el cociente entre la potencia de calentamiento “P” en relación con el radio del plasma. Este índice sitúa a ASDEX más cerca de los reactores futuros como ITER que ningún otro dispositivo a nivel mundial. Cabe destacar que se ha trabajado con personas (figura 3.2.2.3) y archivos de este reactor para la realización de la parte final de este proyecto, como se verá en el capítulo 5.

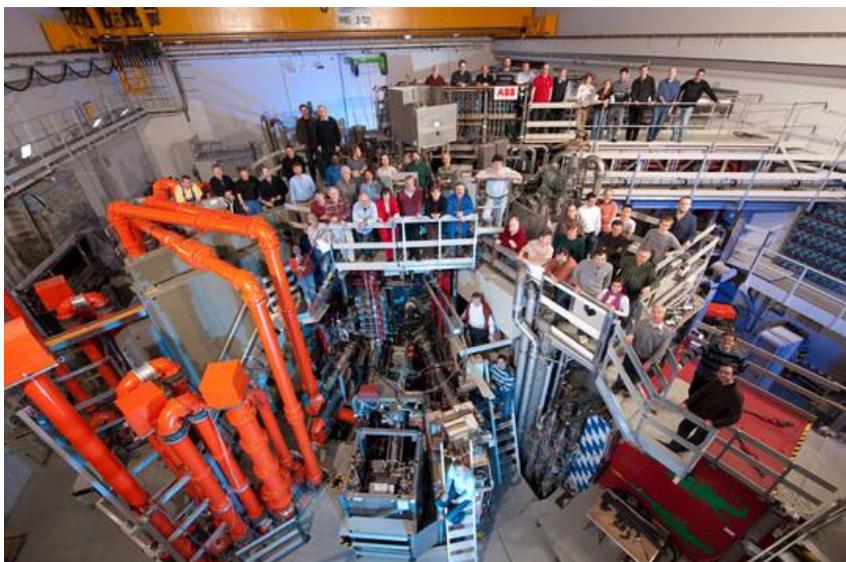


Figura 3.2.2.3. Equipo de trabajadores del ASDEX, compuesto por más de 200 científicos (29)

3.2.3. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

[8] El reactor Tokamak ITER (figura 3.2.3.1) es un experimento científico a gran escala en construcción (figura 3.2.3.2). Se está realizando en Cadarache, Francia, y se convertirá en uno de los proyectos más costosos de la historia, entre otros como la creación de la Estación Espacial Internacional, el proyecto Manhattan o el desarrollo del GPS. En él participan 35 naciones de todo el mundo y su principal objetivo es el de demostrar la viabilidad de la fusión nuclear como fuente de energía eléctrica. Intentará ser el primer reactor en producir energía neta, es decir, generar más energía de la necesaria para que funcione. A su vez será el primero en mantener la fusión de forma prolongada y estable.

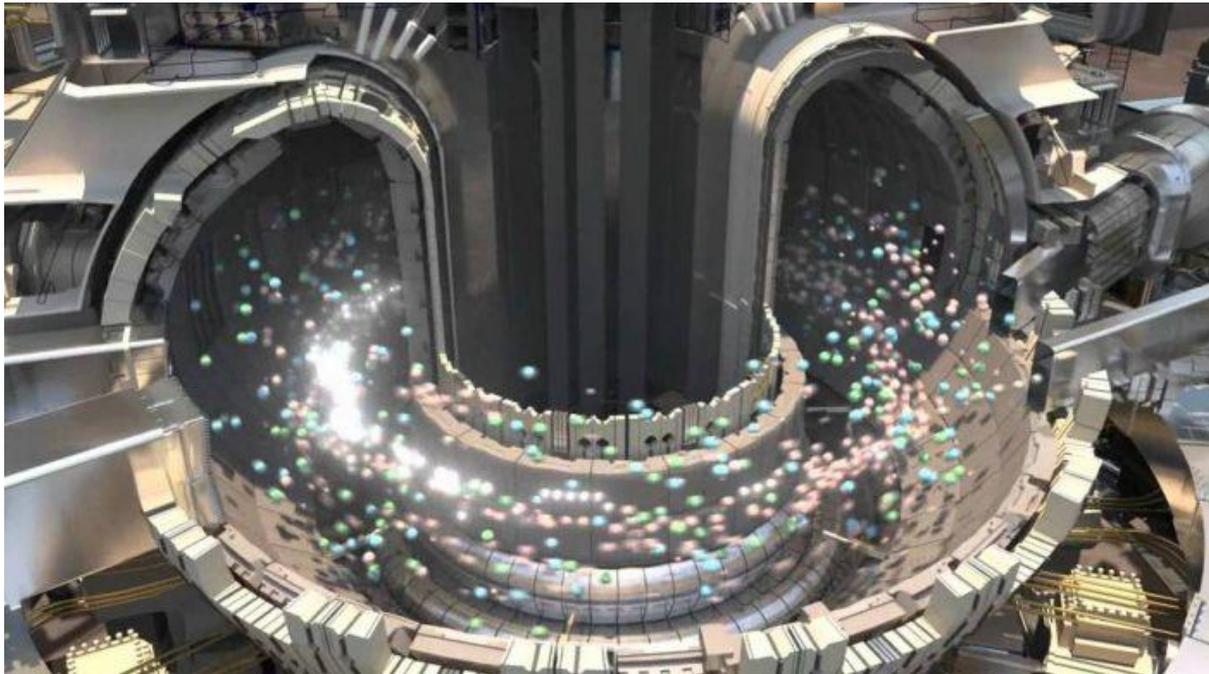


Figura 3.2.3.1. Representación artística del futuro reactor de fusión ITER en funcionamiento (30)

ITER tendrá unas dimensiones 10 veces superiores a la del reactor más grande en la actualidad. Así tendrá más capacidad para sostener mayor cantidad de plasma durante más tiempo. Durante su funcionamiento, intentará producir 500 MW de potencia de fusión, superando con creces el record actual del JET. Además, intentará lograr una relación entrada-salida de energía de $Q=10$, lo que quiere decir 10 veces más energía producida que la necesaria para su operación.

El material utilizado como combustible será el deuterio-tritio, cuya reacción se sostiene mediante calentamiento interno. En futuras pruebas se intentará producir tritio a partir de litio dentro del reactor en funcionamiento, ya que el suministro natural de tritio es escaso para la producción futura.

Este reactor será un paso intermedio necesario entre la experimentación actual y futuras centrales eléctricas de fusión. Para que su funcionamiento sea el esperado, todos los reactores actuales centran sus objetivos en el estudio de futuros ambientes y materiales de este reactor, como los ya mencionados JET y ASDEX. Tiene como objetivos producir el primer plasma en 2025 y llevar a cabo las primeras operaciones de deuterio y tritio en 2035.



Figura 3.2.3.2. Construcción del reactor ITER (31)

3.2.4. DEMO (DEMONstration Power Station)

[9] DEMO es un reactor propuesto a posteriori de la construcción y funcionamiento del reactor ITER. Su objetivo principal es el de establecer un puente intermedio entre el reactor ITER y los reactores comerciales de energía nuclear (figura 3.2.4.1). Aún no se sabe con exactitud el alcance ni el lugar dónde se llevará a cabo. Sin embargo, debería producir como mínimo 2 gigavatios de potencia de forma continua, es decir, 25 veces más la energía invertida para su funcionamiento. Para ello deberá ser al menos un 15% mayor que ITER además de tener una densidad del plasma un 30% mayor que el mismo.

Las estimaciones más optimistas establecen que el diseño conceptual de este reactor deberá ser finalizado en 2020, mientras que el diseño de ingeniería y construcción para 2030 con el objetivo de empezar a operar en 2044.



Figura 3.2.4.1 Evolución prevista de los reactores tipo Tokamak (32)

3.3. Reactores de fusión de tipo Stellarator

[10] El nombre de Stellarator hace referencia a “Star” y “Generator”, al ser este un modo de producir energía que imita la forma en que lo hacen las estrellas.

Su diseño fue propuesto por el físico teórico estadounidense Lyman Spitzer Jr. sobre el año 1950, curiosamente anterior al diseño Tokamak, y construido un primer diseño en Princeton durante esa misma década.

Su principal peculiaridad con respecto a los Tokamak es que, con un único sistema de bobinas, es capaz de producir la jaula magnética para confinar el plasma, sin necesidad de inducir corriente en el plasma y evitando por ello el uso del transformador central (el Tokamak necesitaba crear un campo magnético toroidal y poloidal mediante el bobinado y la corriente en el plasma). Esto hace que este tipo de reactores sea más adecuado para el funcionamiento continuo que los Tokamak.

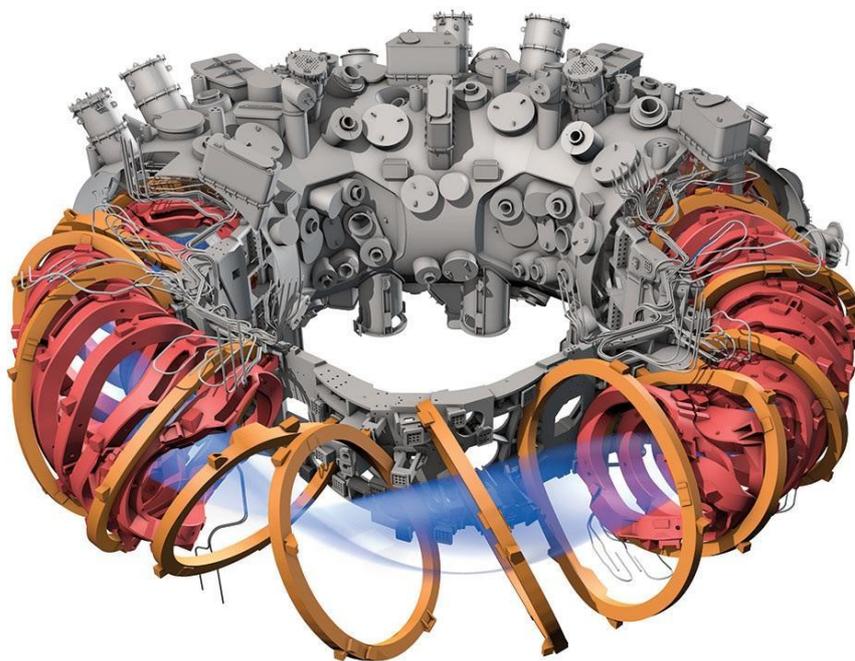


Figura 3.3.1 Representación reactor tipo Stellarator (33)

Al utilizar únicamente el toroidal para confinar el plasma, es necesario que dicho bobinado tenga una forma compleja, como podemos ver en la figura 3.3.1, produciendo un plasma con una geometría igualmente compleja. Como consecuencia, el diseño Stellarator es de una complejidad superior a la de los Tokamak, al igual que el estudio de su plasma. Sin embargo, esto proporciona libertades adicionales en la conformación del campo magnético, haciendo posibles optimizaciones del mismo.

Los Stellarators podrían proporcionar una solución tecnológicamente más simple en una futura central eléctrica que los Tokamak. Sin embargo, sólo con el marco teórico no es posible demostrarlo. La experimentación en reactores como el Wendelstein 7-X en el IPP ayudarán a esclarecer algo más esta cuestión.

3.3.1. Bobinas magnéticas

[10] El plasma está confinado mediante una jaula magnética producida por una serie de bobinas. Lo característico es que, a diferencia del Tokamak, las bobinas tienen una forma especial (figura 3.3.1.1) para producir un campo magnético tridimensional.

Las bobinas del Stellarator, en lugar de rieles de cobre rígidos, están formadas por hebras de cobre más flexibles incrustadas en forma de bobinado. La resistencia mecánica de las mismas es proporcionada por bandas de fibra de vidrio y resina sintética.



Figura 3.3.1.1. Bobina magnética del Stellarator Wendelstein 7-X durante su montaje (34)

3.3.2. Vasija del reactor

[10] En este aspecto no varía mucho en cuanto a la vasija del Tokamak. Al igual que este último, el Stellarator debe ser capaz de aislar la zona plasmática del exterior, necesitando un nivel de vacío de unos 10^{-8} milibares. Para soportar presiones tan bajas y los esfuerzos generados por los campos magnéticos, la vasija debe estar fabricada en un acero de alto grado. Sin embargo, ésta tendrá la compleja forma típica de los Stellarator, como se muestra en la figura 3.3.2.1, dónde se fotografía el interior de la vasija.



Figura 3.3.2.1. Interior de un reactor tipo Stellarator (35)

3.3.3. Límite del plasma

[10] A diferencia que en los Tokamaks, en los Stellarators no se necesita desviar el plasma. Este se mueve, de acuerdo a la simetría del reactor, a diferentes zonas de la pared. Por lo tanto se colocarán colectores discontinuos en estas áreas, como se observa en la figura 3.3.3.1, con el objetivo de neutralizar partículas o desechos y posibilitando su bombeo.

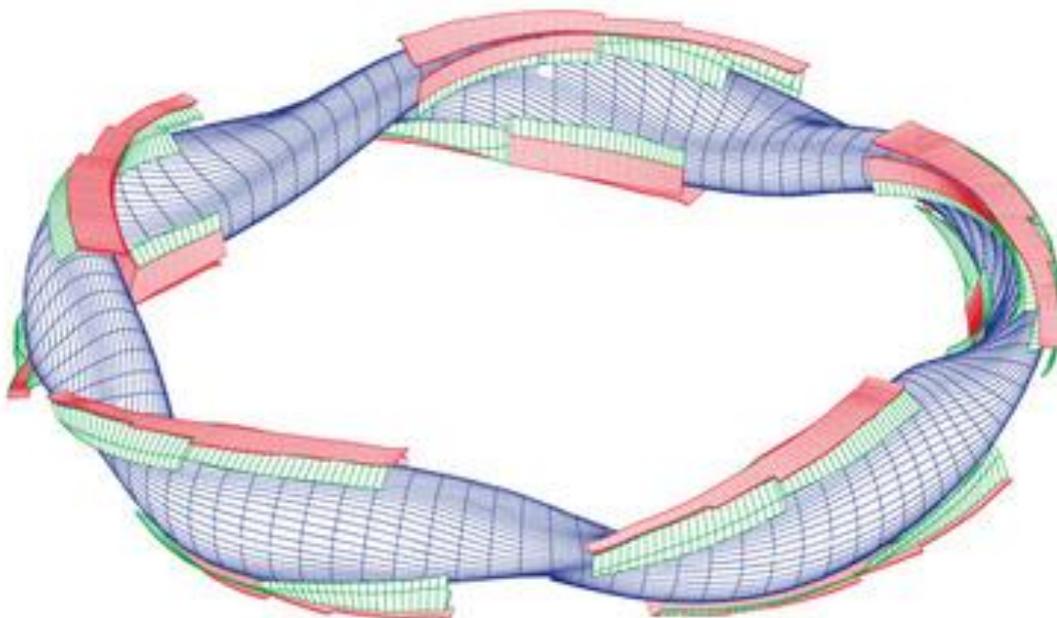


Figura 3.3.3.1. Distribución de las placas del divertor en un reactor tipo Stellarator (36)

3.3.4. Repostaje de combustible

[10] Al igual que en los Tokamak, el combustible poco a poco se gasta, por lo que hay que seguir suministrando. Existen varios métodos de reabastecimiento del mismo: soplado de gas desde el borde del recipiente, inyección de partículas neutras e inyección de pellets o gránulos (todo de la misma forma que en los Tokamak). Por ejemplo, el Wendelstein 7-X contará con un acelerador de los gránulos, el cual los impulsará a una velocidad de 60 gránulos por segundo

3.3.5. Procedimiento de descargas del reactor

[10] El procedimiento de descarga comienza con la puesta en marcha de los campos magnéticos, desarrollando las propiedades de confinamiento sin estar aún presente el plasma. El gas hidrogeno es entonces introducido y transformado en plasma mediante inyección de partículas neutras.

Como no existe corriente en el plasma, la fase inicial de la descarga se rige por la acumulación de densidad, alcanzándose rápidamente el estado de ignición. La descarga finalizará únicamente por el tiempo de calentamiento, haciendo posible el funcionamiento estacionario en un principio. En la figura 3.3.5.1 se muestra una de estas descargas. En la referencia "(37)" se puede acceder al video completo de la descarga.



Figura 3.3.5.1. Descarga en el reactor Stellarator Wendelstein 7-X (37)

3.4. Principales reactores de fusión de tipo Stellarator

Aunque en la actualidad el desarrollo de los Tokamak ha tomado la delantera en la carrera de la fusión, no deja de lado la importancia de este tipo de reactores en cuanto a investigación y recogida de datos. La posibilidad de continuidad en los Stellarator sigue siendo motivo de disputa entre cuál de los dos es mejor opción.

A continuación se expondrán los reactores Stellarator más relevantes y destacados.

3.4.1. Wendelstein 7-X

[11] El Wendelstein 7-X (figura 3.4.1.1) es el reactor tipo Stellarator más grande del mundo en la actualidad. Situado en Greifswald (Alemania) por el instituto Max-Planck de física del plasma, acabó su construcción en 2015 y en 2016 ya había producido su primer plasma (figura 3.4.1.2). Tiene como objetivo principal el de investigar la idoneidad y viabilidad de este tipo de reactores para futuras centrales eléctricas. La estructura compuesta de bobinas individuales permite que el campo magnético se moldee en detalle. Se espera que este reactor produzca un plasma de una calidad comparable a la de un Tokamak del mismo tamaño, pudiendo este a su vez ejecutar descargas de mayor tiempo. Con descargas de 30 minutos a unas temperaturas de 100 millones de grados se intentará demostrar la capacidad de continuidad en estos reactores.

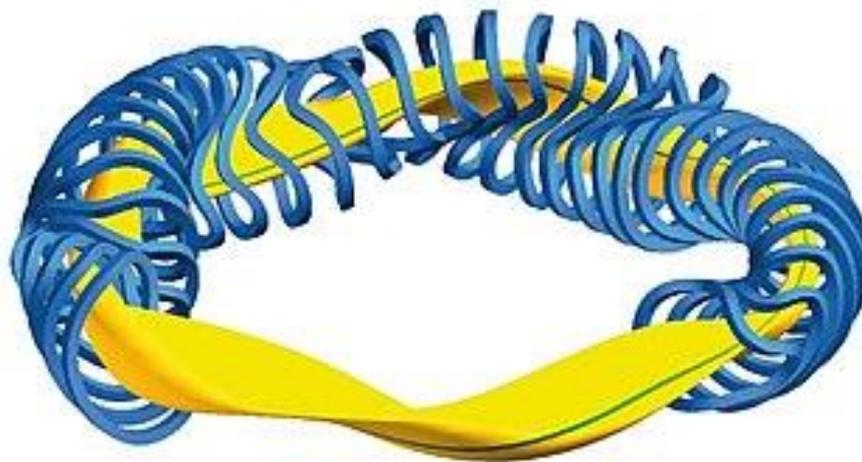


Figura 3.4.1.1. Representación del plasma en el reactor Wendelstein 7-X (38)

Los principales objetivos de este reactor son optimizar los campos magnéticos asociados y comprobar la continuidad del plasma. Por lo tanto, para lograr dichos objetivos, no se necesita la obtención de un plasma de fusión, donde se esté realizando la reacción. Esto se debe a que estas propiedades del plasma pueden ser transferidas del Tokamak ITER, por lo que, al no utilizar tritio, se reducen en gran cantidad los gastos de experimentación.

En cuanto a sus características principales, el Wendelstein 7-X tiene un radio mayor de unos 5.5 metros y un radio menor de 0.53 metros, quedando un volumen de unos 30 m³. El campo magnético que en él se produce es de unos 3 T. Está envuelto por 50 bobinas de niobio-titanio superconductores, de unos 3.5 metros de altura, refrigeradas por nitrógeno líquido. Posee más de 250 aberturas para la instalación de diagnósticos.

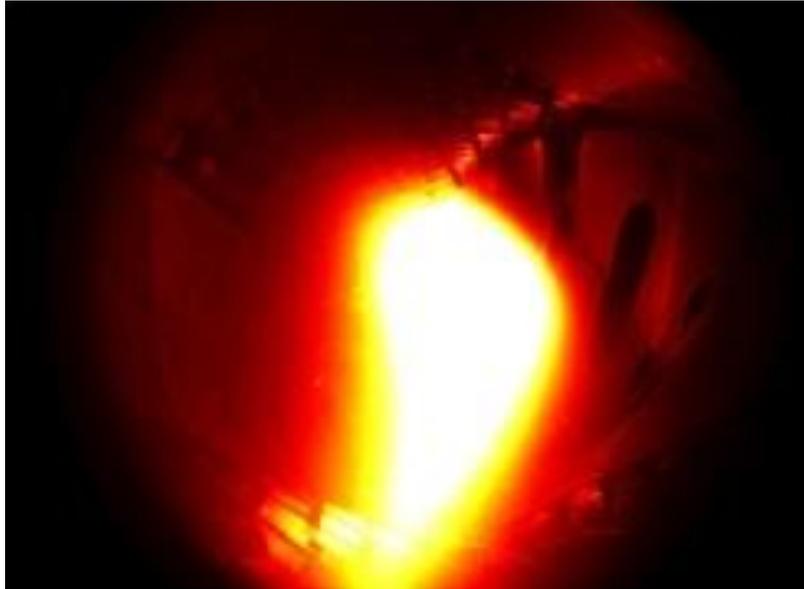


Figura 3.4.1.2. Primer plasma en Wendelstein (39)

3.4.2. TJ-II

[12] El TJ-II (figura 3.4.2.1) es un Stellarator instalado en el Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT, en Madrid, España. Su primer plasma fue producido en 1997 y a día de hoy sigue en funcionamiento. Se diseñó partiendo de datos de investigación de científicos del centro, en colaboración con el IPP y ORNL (Oak Ridge National Laboratory). Es el segundo reactor Stellarator más grande de Europa y su objetivo principal es investigar la física del plasma en un dispositivo de confinamiento magnético con eje helicoidal y gran flexibilidad.

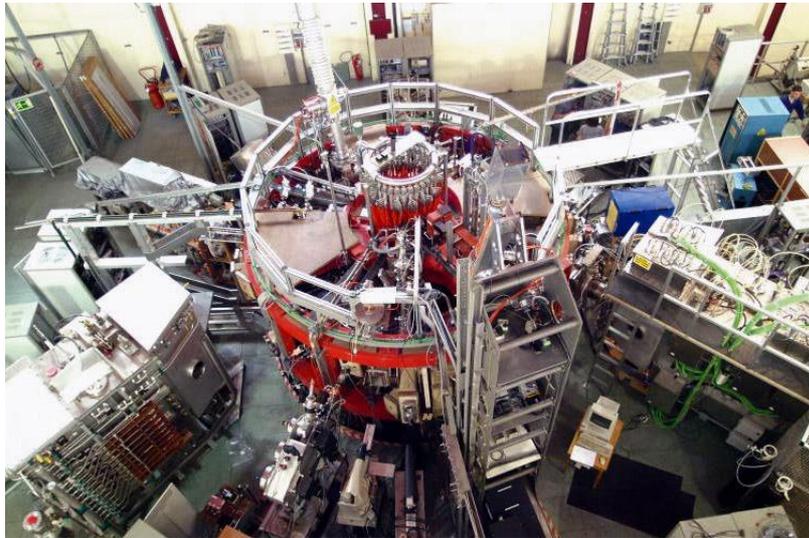


Figura 3.4.2.1. Reactor TJ-II visto desde arriba (40)

El confinamiento magnético se consigue mediante 32 bobinas, que realizan la jaula magnética antes de que el plasma se sitúe en ella. Tiene un radio mayor de 1.5 metros y el campo magnético que es capaz de producir llega hasta 1.2 T. En él destaca la característica de ser “flexible”, entendiéndose por esto a que es capaz de modificar su configuración magnética mediante cambios en las corrientes que pasan por sus bobinas.

4 ESTUDIO DEL PLASMA EN EL REACTOR

"Lo importante es no dejar de hacerse preguntas"

Albert Einstein

Si se habla de plasma como estado de la materia, éste se entiende como una fase más allá de la gaseosa (figura 4.1), en la cual los electrones han sido excitados y por tanto desprendidos de sus orbitales, dejando el núcleo atómico aislado de los mismos. Esta ionización puede conseguirse aumentando la temperatura a niveles muy altos o por otros métodos como la aplicación de fuertes campos magnéticos. Los electrones permanecen en el gas pero son libres de moverse de manera independiente. Consecuentemente, el gas (ahora plasma) contiene unas partículas con carga positiva y otras con carga negativa. El hecho de que el gas se encuentre ionizado hace que su comportamiento cambie notablemente, haciendo que se vea afectado por campos magnéticos o eléctricos.

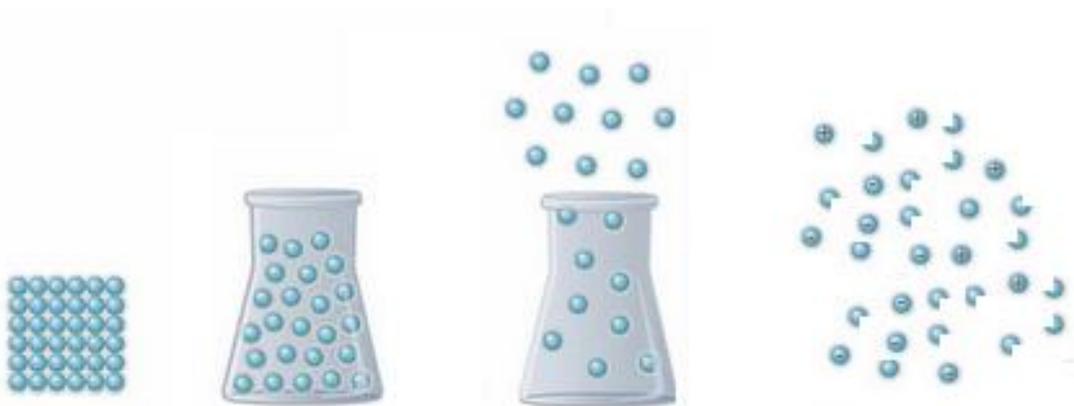


Figura 4.1. Evolución de los estados de la materia conforme se le va aumentando su energía (41)

4.1. Plasma en la naturaleza y en nuestro planeta

[13] El 99% de la materia que compone el universo está en estado de plasma. Podemos encontrar este estado tanto en el interior de las estrellas como en el espacio interestelar e incluso en el núcleo de los planetas. Pero no sólo el universo es el único sitio dónde observarlo. Aquí en nuestro planeta puede manifestarse formando las conocidas auroras boreales en los puntos más al norte del planeta, como se muestra en la figura 4.1.1. También se le cataloga como plasma a las descargas o rayos producidos durante una tormenta eléctrica.



Figura 4.1.1. Auroras boreales, un tipo de plasma en nuestro planeta (42)

También existen plasmas controlados artificialmente. Las televisiones de plasma o los tubos de neón, que mediante la interacción de corriente eléctrica con el mismo se emite su característica luz, son algunos ejemplos de ellos.

Sin embargo, aunque el plasma se considera como el cuarto estado de agregación de la materia, obteniéndose de calentar un gas e ionizar sus partículas, dependiendo de la temperatura que alcanzan y su densidad se pueden clasificar en distintos tipos representados en la figura 4.1.2.

Otro factor a tener en cuentas es la longitud de Debye λ_d . Éstas hacen referencia a la distancia a las cual puede ocurrir una separación de cargas tras una inestabilidad del fluido, siendo estas proporcionales a la temperatura T y la densidad del plasma n (4).

$$\lambda_d \approx 7430 \sqrt{\frac{T}{n}} \quad (4-3)$$

Por último, una vez que el plasma se ha formado en el reactor, éste se mueve a gran velocidad, lo que hace que las partículas que lo forman puedan chocar entre sí, produciendo colisiones. Como ya se ha comentado, la reacción con mayor sección eficaz tras el choque para producir fusión es la del deuterio-tritio. Para el cálculo del número de reacciones por segundo en el reactor habrá que tener en cuenta ambos factores. Tanto la sección eficaz σ como la velocidad v de dichas partículas influyen en el ratio de reacción, al igual que la densidad de dichas partículas n (5).

$$R = \langle \sigma \cdot v \rangle \times n \quad (4-4)$$

[13] Los iones y electrones se comportan de manera distinta bajo la acción de campos magnéticos debido a su diferencia de carga. En un reactor de tipo Tokamak, al añadir el campo toroidal para la estabilización del plasma, los electrones e iones describirán movimientos helicoidales siguiendo las líneas de campo, unos hacia una dirección y otros hacia la contraria. El radio de dichos helicoides da información sobre las características de cada partícula. Dicho radio r_L puede ser calculado mediante la ecuación de Larmor (6), la cual relaciona dicha dimensión con la masa m , velocidad perpendicular al campo magnético v_{\perp} y carga de la partícula q sometida al campo magnético B . En un plasma típico de fusión, los electrones tienen un radio de Larmor de unos 67 μm , mientras que los núcleos de deuterio de 4,1 mm.

$$r_L = \frac{m v_{\perp}}{qB} \quad (4-5)$$

Además, a medida que se someten a dichos campos magnéticos, las partículas se ven aceleradas por la acción del mismo. Así, la frecuencia que se tiene que aplicar a la oscilación del campo eléctrico para sincronizarse con las partículas, de forma que cada vez las acelere, se llama frecuencia de resonancia del ciclotrón f_c , siendo la velocidad angular del movimiento w_c . En la ecuación se muestra el cálculo de dicha frecuencia, donde q es la carga de la partícula acelerada, B el campo magnético a la que está sometida y m la masa de la partícula (7).

$$f_c = \frac{w_c}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (4-6)$$

4.3. Comportamiento del plasma en el campo magnético

[14] El campo magnético en los reactores de fusión de tipo Tokamak presenta una componente poloidal y otra toroidal. Las partículas cargadas existentes en el interior de la máquina se desplazan siguiendo las líneas de campo del campo magnético resultante, diferenciándose dos tipos de trayectorias en este caso, las “trapped” y las “passing”.

Así la trayectoria de las partículas del plasma no es siempre idéntica. Las partículas de trayectorias tipo “passing” son aquellas que describen un movimiento toroidal alrededor del eje central de manera relativamente regular, mientras que las partículas que siguen una trayectorias de tipo “trapped” son aquellas que se ven envueltas en idas y venidas dando lugar a movimientos cuya proyección en la sección poloidal da lugar a una geometría conocida como “de plátano” o “de banana”. La proyección poloidal de dichas trayectorias “trapped” se representa en amarillo a continuación en la figura 4.3.1.

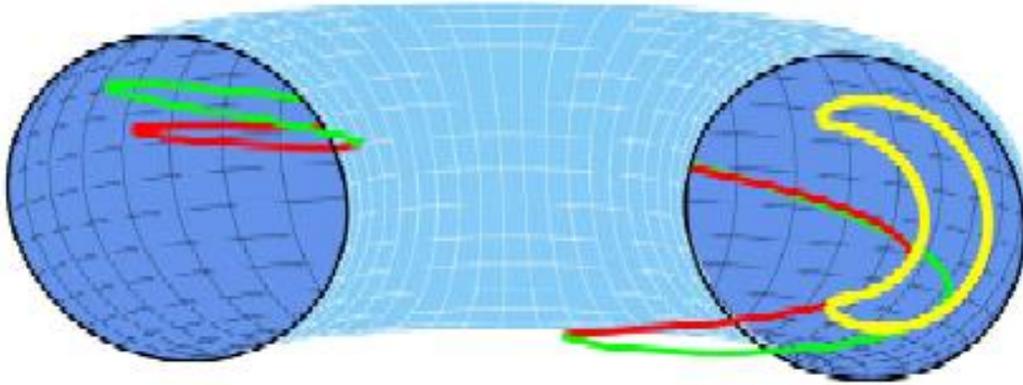


Figura 4.3.1. Movimiento de las partículas tipo “trapped” en el reactor (44)

El plasma, normalmente, se ve sometido a vibraciones e inestabilidades. En este comportamiento vibratorio hay que mencionar lo que se conoce como modos de vibración del plasma o de Alfvén. Estos modos de vibración son ondas transversales que se generan en el plasma sometido a campos magnéticos.

Estos modos de vibración son muy estudiados hoy día de cara al perfeccionamiento de reactores futuros como ITER. Las inestabilidades que producen pueden ser perjudiciales para el diseño de estos.

Existen dos tipos principales de modos de vibración o modos de Alfvén. En primer lugar destacan los RSAEs (Reversal Shear Alfvén Eigenmodes) o modos de vibración de Alfvén “invertidos”, los cuales atraviesan el plasma, mientras que por otro lado tenemos los TAEs (Toroidal Alfvén Eigenmodes), localizados en la parte más externa del propio plasma, también conocida como “separatrix”.

Es aconsejable, antes de seguir hablando de los modos de vibración, conocer el llamado factor de seguridad q . Éste se define como el cociente entre el número de vueltas en sentido toroidal que dan los campos magnéticos con respecto a las que dan en sentido poloidal (8).

$$q = \frac{\text{Vueltas en sentido toroidal}}{\text{Vueltas en sentido poloidal}} \quad (4-7)$$

Además, es importante introducir el concepto de rho poloidal. Se define rho poloidal o ρ como una coordenada magnética que relaciona el flujo magnético en el interior del reactor con su geometría. Por tanto, se trata de una componente dependiente de la altura Z y del radio R del reactor. En la figura 4.3.2 se observa, en un corte transversal de un reactor Tokamak, la representación de los distintos niveles de rho poloidal (líneas rojas) en función de las coordenadas geométricas del reactor (R y Z). Cabe destacar que, para cada una de las descargas del reactor, dichos niveles variarán, al depender del flujo magnético producido. Además, existen una serie de canales a través de los cuales se obtienen los datos necesarios para el estudio de las distintas descarga. Estos canales son exclusivos para cada uno de los diagnosticos de estudio (se definirá en el apartado 4.4). Cada uno de ellos está asignado a una rho poloidal determinada, obteniendo datos en esa posición. Dichos canales se representan en la figura 4.3.2 como círculos de color negro dentro del reactor.

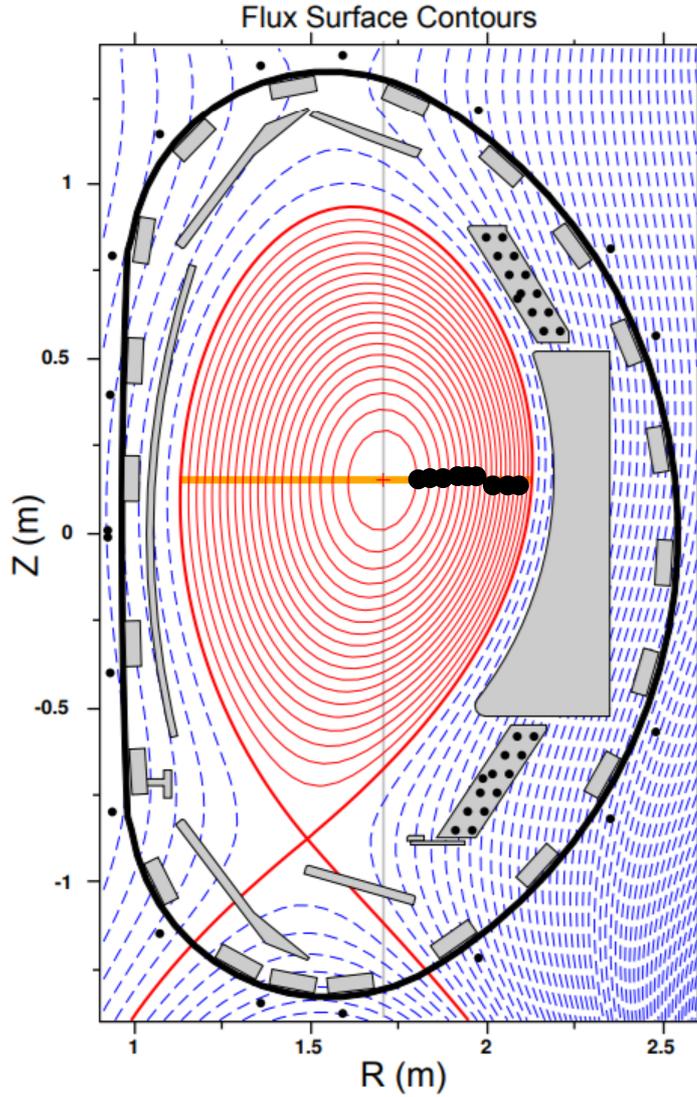


Figura 4.3.2. Corte transversal de un reactor Tokamak en el que se muestran las líneas de coordenada magnética ρ , siendo el eje y la altura Z en metros y la distancia radial R en metros, con algunos canales de medida en forma de círculos negros (45)

Volviendo a los modos de vibración, es característico resaltar que éstos se pueden observar mediante el uso de diagnósticos como Electron Cyclotron Emission (ECE, lo definiremos más adelante). En la figura 4.3.3 se puede ver una representación de los resultados obtenidos con el uso del mismo. En él se muestra la frecuencia del plasma frente al radio menor normalizado (ρ poloidal o ρ) del tokamak, representándose a su vez en distintos tonos la evolución de la temperatura del plasma con respecto a su frecuencia.

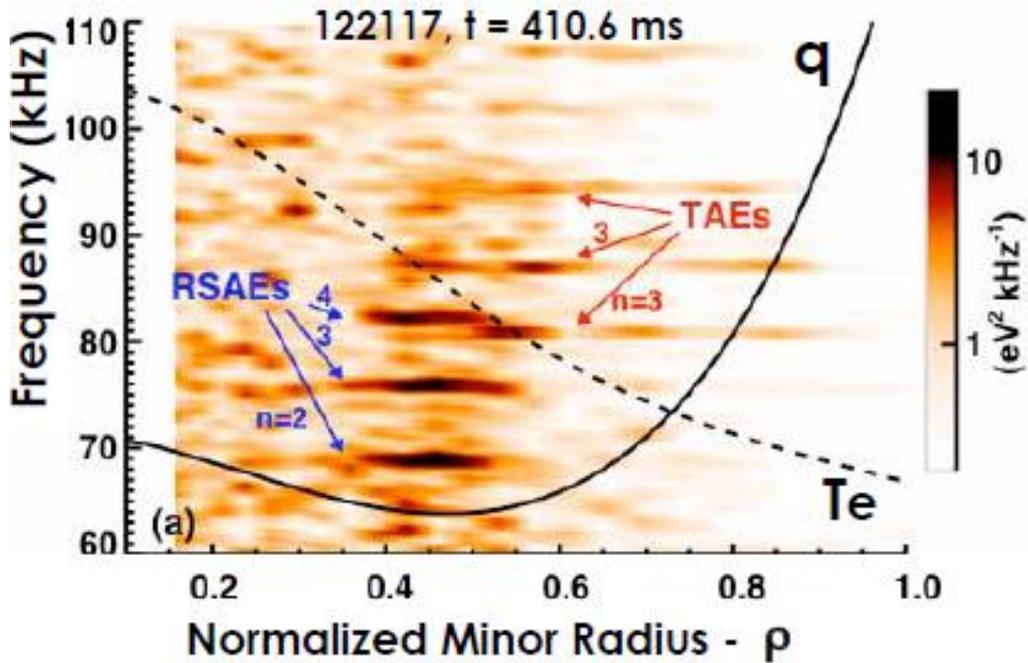


Figura 4.3.3. Resultado de un ECE. Frecuencia del plasma respecto al radio menor normalizado, mostrando los distintos modos de vibración

En él se aprecia la evolución del factor de seguridad a medida que aumenta el ρ poloidal. En concreto, el valor de q desciende hasta llegar a su mínimo, el cual aparece por lo general alrededor de $\rho \sim 0,6$. En estas zonas concretas aparecen los modos tipo RSAEs, al contrario que los TAEs, los cuales se dan en zonas con mayor extensión, alargándose hasta la separatrix. Además se observa la evolución de la temperatura electrónica, la cual, como era de esperar, disminuye desde su máximo en el centro del reactor (dónde se encuentra la zona central del plasma), hasta la separatrix. La evolución de esta temperatura se estudiará en el capítulo 5 para distintas descargas del reactor.

[14] El hecho de mostrar en este experimento diferentes valores de n ($n=2, 3, 4$), es porque se han calculado varios modos de vibración toroidales o TAEs. Los modos de vibración RSAEs tienen asociada la letra m .

La representación de los TAEs en los rangos de valor cercanos al mínimo del factor de seguridad son calculados de acuerdo a su frecuencia como:

$$f_{TAE} = \frac{V_A}{4 \cdot \pi \cdot q_{min} \cdot R} \quad (4-8)$$

Dónde V_A representa la velocidad de las ondas de Alfvén, R el radio mayor en el cálculo de dicha frecuencia y q_{min} el valor mínimo del factor de seguridad del plasma. Además, estos modos de vibración deben de ser corregidos por la rotación toroidal del plasma (9).

Por otra parte, los RSAEs son modos de vibración identificados en valores cercanos al mínimo del factor de seguridad del reactor, y también son conocidos en la documentación estudiada como “cascadas” de Alfvén. Son un tipo de modos de vibración inmersos en el plasma en valores de frecuencia más bajos que los TAEs. En estudios recientes se presta mucha atención a estos modos de vibración de tipo RSAE, debido a su potencial para diagnosticar propiedades del factor de seguridad del perfil del plasma.

Al igual que para los TAE, los RSAE (10) tienen una frecuencia propia que se obtiene a partir de la siguiente igualdad:

$$f_{RSAE} = \frac{(m-n \cdot q_{min}) \cdot V_A}{2 \cdot \pi \cdot q_{min} \cdot R} \quad (4-9)$$

Estos modos de vibración provocan pérdidas de energía como consecuencia de cambios de trayectorias en las partículas, pudiendo reducir el rendimiento de la reacción. El estudio en profundidad de este tipo de sistemas es clave para evitar cambios en el movimiento de las partículas tanto de tipo “passing” como partículas de tipo “trapped” y el mantenimiento de la energía intrínseca del sistema.

4.4. Diagnósticos

[15] Se define como diagnóstico aquel aparato diseñado para medir uno o varios parámetros del plasma (temperatura, densidad, corriente, etc.). Como se mencionó en las características de algunos reactores, en ellos hay instalados multitud de diagnósticos para la obtención de la mayor cantidad de datos por descarga.

Cada reactor posee diferentes tipos de diagnósticos. Entre los más comunes y destacados se encuentran:

- Bolómetro: Se emplea para medir la energía emitida por el plasma a través de su radiación. Para ello, utiliza el cambio de temperatura producido en la resistencia de un conductor muy fino, debido al calentamiento de éste a consecuencia de la radiación del plasma.
- Medida de la radiación D- α : Este tipo de radiación se produce cuando el electrón del átomo de deuterio experimenta una transición. La medida de la intensidad de esta radiación se utiliza como diagnóstico del borde de plasmas que contengan deuterio puesto que depende entre otros parámetros, de la densidad de átomos de deuterio, la densidad de electrones y de la temperatura del plasma.
- Saddle loop: Se emplea para medir flujo magnético como diagnóstico del plasma.
- Spectroscopy system: Diagnóstico del plasma basado en el análisis de la luz emitida por éste en distintos rangos de longitudes de onda.
- Electron Cyclotron Emission (ECE): Se basa en la captación de ondas electromagnéticas a la frecuencia ciclotrónica emitida por los electrones del plasma, que giran en torno al campo magnético, en un dispositivo de confinamiento magnético. La medida de esta emisión puede utilizarse diagnóstico del plasma, para estimar la temperatura de los electrones de éste.

Los datos de este último es que se analizará en el capítulo 5, a partir del cual se detectarán los modos de vibración del plasma. A continuación se expone una serie de características sobre el diagnóstico ECE.

4.5. Diagnóstico ECE

[16] El Electron Cyclotron Emission (ECE) es un diagnóstico implementado en reactores de fusión mediante el cual se mide la temperatura de los electrones intrínsecos al plasma. Se compone de 60 canales, cada uno de ellos con una antena que recibe la radiación electromagnética para tomar los datos, tomando por tanto 60 listas de datos en distintos puntos de R y Z del reactor (la estructura del mismo se muestra en la figura 4.4.1). Cabe destacar que R y Z no son siempre el mismo valor, cambia según la descarga.

La variación de la temperatura obtenida a través del perfil del plasma está correlacionada con una variación de densidad de las partículas en el mismo. Conocido esto, se puede hacer entonces una transformada de Fourier a la señal e identificar de esta manera la posición de los modos de vibración del plasma. La representación que comentamos es la correspondiente a la figura de la página anterior, dónde se puede observar satisfactoriamente los modos para esa descarga.

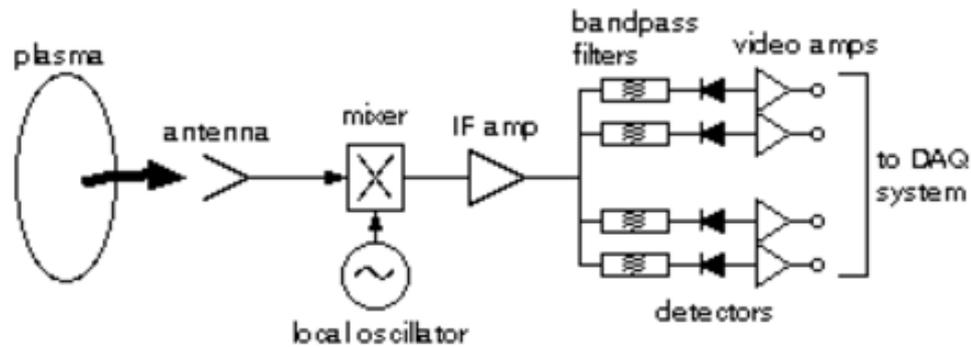


Figura 4.5.1. Receptor de datos de ECE (46)

Los datos obtenidos del ensayo y tras su procesamiento, se utilizan como fuente de contraste para el algoritmo NOVA, basado en las ecuaciones de la magnetohidrodinámica (MHD). Este algoritmo nos muestra en una sección del reactor la temperatura, densidad electrónica, factor de seguridad... Se está demostrando que este algoritmo se corresponde bastante bien con los datos suministrados de ECE. Sin embargo, en algunas ocasiones se ha demostrado que el diagnóstico ECE no es completamente perfecto, como en casos con baja densidad de plasma o con una serie de “ruidos”.

Dentro del diagnóstico ECE existen gran variedad de archivos o “shotfiles” que contienen datos de medidas de las diferentes propiedades del plasma. Entre ellos se encuentran los archivos “CEC”, donde se retienen los datos de temperatura ya calibrados para cada uno de los 60 canales comentados anteriormente.

Cada uno de estos valores va asociado a una posición de R y Z en el plasma. Estas posiciones no son fijas como hemos dicho, y tanto éstas como la temperatura son calculadas por este diagnóstico a una frecuencia de muestreo de 8 KHz. Sin embargo, en ocasiones esta frecuencia es demasiado baja. Para solucionar el problema se puede utilizar otro tipo de diagnósticos como el RMC, el cual posee una frecuencia de estudio de 1 GHz, lo que recogerá muchos más datos que el CEC. Este diagnóstico, al igual que ECE, registra valores de temperatura.

5 MULTIPOW Y PROGRAMACIÓN

“La ciencia de hoy es la tecnología del mañana”

Edward Teller

Una vez que los diagnósticos recogen los datos de las descargas en los reactores, son necesarias ciertas herramientas de análisis para obtener conclusiones a partir de ellos. Es aquí donde se introduce la herramienta Multipow. Ésta se utiliza como análisis de las temperaturas del plasma registradas en el diagnóstico ECE, descrito en el apartado anterior. Mediante ella es posible visualizar los modos de vibración que aparecen en el plasma en función del radio menor (ρ poloidal) y de la frecuencia para una descarga e intervalo temporal en concreto. El estudio de los modos posee una importancia vital, ya que mediante ellos se pueden predecir pérdidas en el rendimiento del plasma, así como lograr una mayor optimización de la reacción.

En este último capítulo se desarrollará la programación, realizada en Matlab, de Multipow. Para la realización del código ha sido necesario un escritorio virtual de Oracle y una VPN particular ofrecida por el Instituto alemán de Física del plasma Max Planck, dando acceso a la lectura de datos de su reactor ASDEX y a útiles para la programación. Entre ellos se encuentran la herramienta SPECVIEW, en la que se dibujan los modos en función del tiempo y la frecuencia, DIAGGEOM, que muestra varias características del plasma en un corte transversal del reactor y MATLAB, dónde se programa. Todas estas herramientas se mostrarán en el apartado 5.1. La plataforma de trabajo será Linux, caracterizado por su ventana de comandos, como se muestra en la figura 5.1.

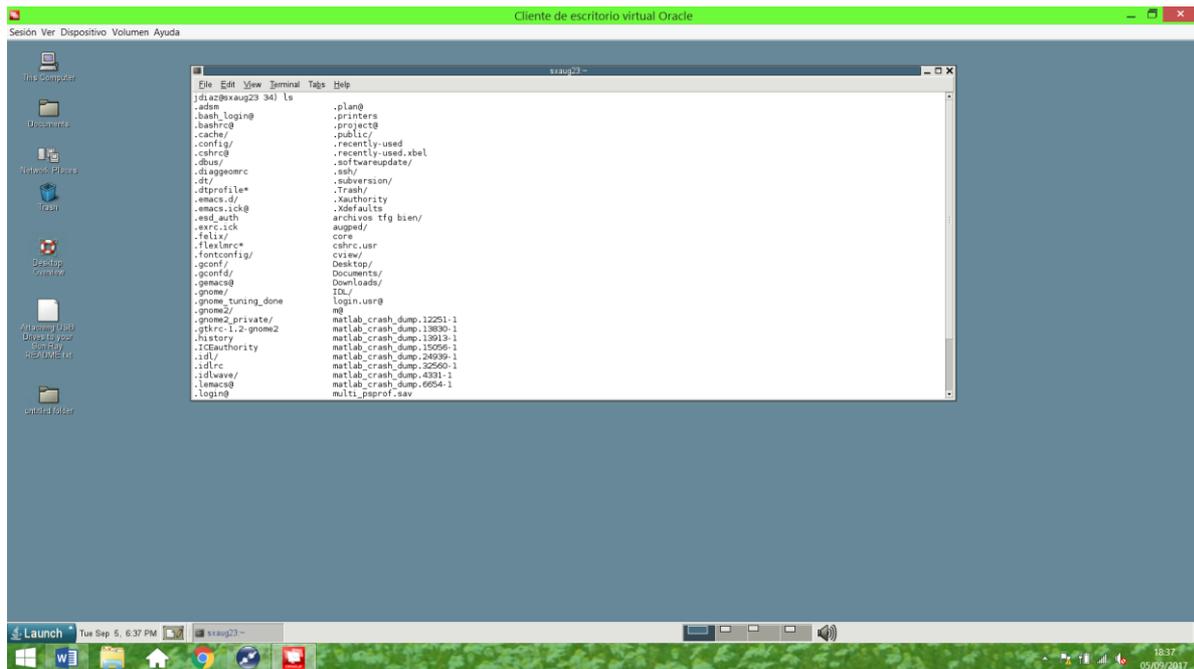


Figura 5.1. Interfaz de Linux utilizada para trabajar

5.1. Herramientas utilizadas

Para una mayor fluidez en la explicación del código y resultados que se expondrán más adelante, se van a repasar las herramientas nombradas en la introducción del capítulo que se han utilizado para su realización.

Comenzamos con la herramienta SPECVIEW. En ella se representa para una descarga concreta, estudiada previamente, en función de la frecuencia (eje y) y el tiempo (eje x), la variación de la temperatura adimensional del plasma en escala logarítmica ($\log(\frac{\delta T_e}{T_e})$), distinguiendo fácilmente los distintos modos de vibración del plasma y el momento y con qué frecuencia aparecen. Con ella se puede determinar que intervalo de tiempo de muestreo tomar para que en la representación del Multipow no aparezcan inestabilidades (aquel intervalo en el que un modo se mantenga a la misma frecuencia).

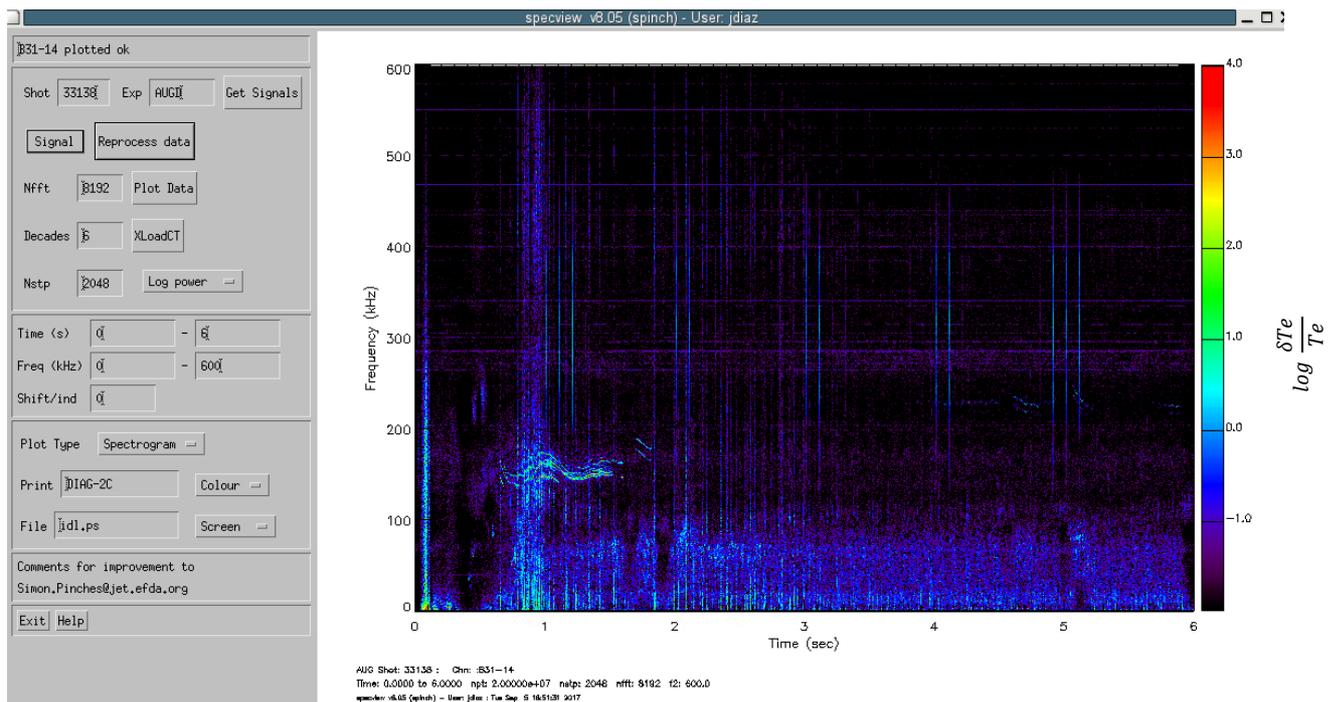


Figura 5.1.1. Representación gráfica de la variación de la temperatura adimensional del plasma en escala logarítmica en función de la frecuencia y del tiempo en un “shot”

La descarga seleccionada para la representación de la figura 5.1.1 es la “33138”, la cual se utilizará a partir de ahora como descarga de referencia para las explicaciones, ya que, aunque el código del último apartado funciona para cualquier descarga existente, es la que se ha tomado de referencia para su desarrollo.

Dicho esto, otro de los elementos o herramientas importantes a utilizar ha sido DIAGGEOM, el cual muestra un corte en sentido poloidal del reactor en 2D, como aparece en la figura 5.1.2. En él aparece dicho corte acompañado de una serie de representaciones a elegir (separatrix, superficies de flujo, ejes magnéticos, líneas delimitando rho poloidal...) sobre una descarga y un instante de tiempo previamente seleccionados. En él se muestran también las posiciones de los distintos canales (círculos negros en el interior del reactor en la figura 5.1.2) de toma de datos de ECE, tanto en coordenadas R y Z como en posición rho poloidal, representada por líneas rojas (estas variables se definieron con anterioridad en el capítulo anterior). Cabe señalar que la representación se basa en la solución de equilibrio del plasma en ese sistema. Alrededor de dicha solución es dónde se suceden las oscilaciones del plasma, producidas por inestabilidades del mismo. Esta última herramienta es especialmente útil a la hora de ordenar los canales y comprobar cuál de ellos no funcionan para eliminarlos en el futuro Multipow.

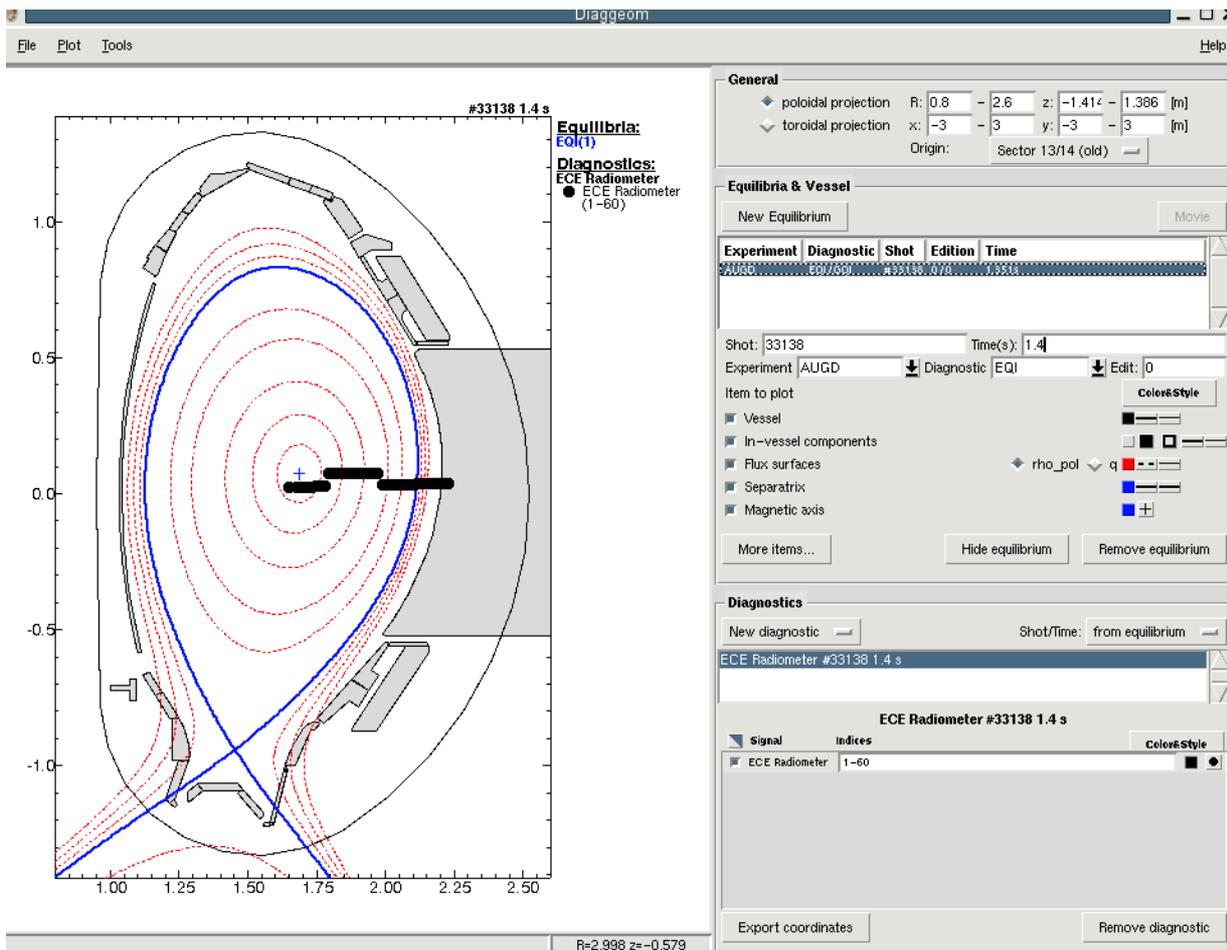


Figura 5.1.2. Interfaz de Diageom

Finalmente queda la herramienta clave para la realización del estudio y del código, la herramienta MATLAB (figura 5.1.3). En la interfaz ofrecida no es necesaria su instalación, ya que mediante una serie de comandos se puede acceder a ella de forma remota. Esta forma de utilizar este programa es óptima por el hecho de que no es necesario tener el equipo encendido para que siga ejecutando los códigos si estos tardan mucho tiempo.

Su facilidad a la hora de programar y visualizar lo realizado es la clave por la cual el proyecto se ha realizado en esta plataforma y no en programación de lenguaje IDL.

La base de datos de MATLAB posee además una serie de instrucciones de uso de sus comandos (específicos del IPP) para mayor facilidad en la programación. En concreto en el proyecto será de gran utilidad las ayudas "help sf" y "help kk", las cuales nos indican como leer los distintos tipos de "shot files" y como pasar de R y Z a rho poloidal respectivamente.

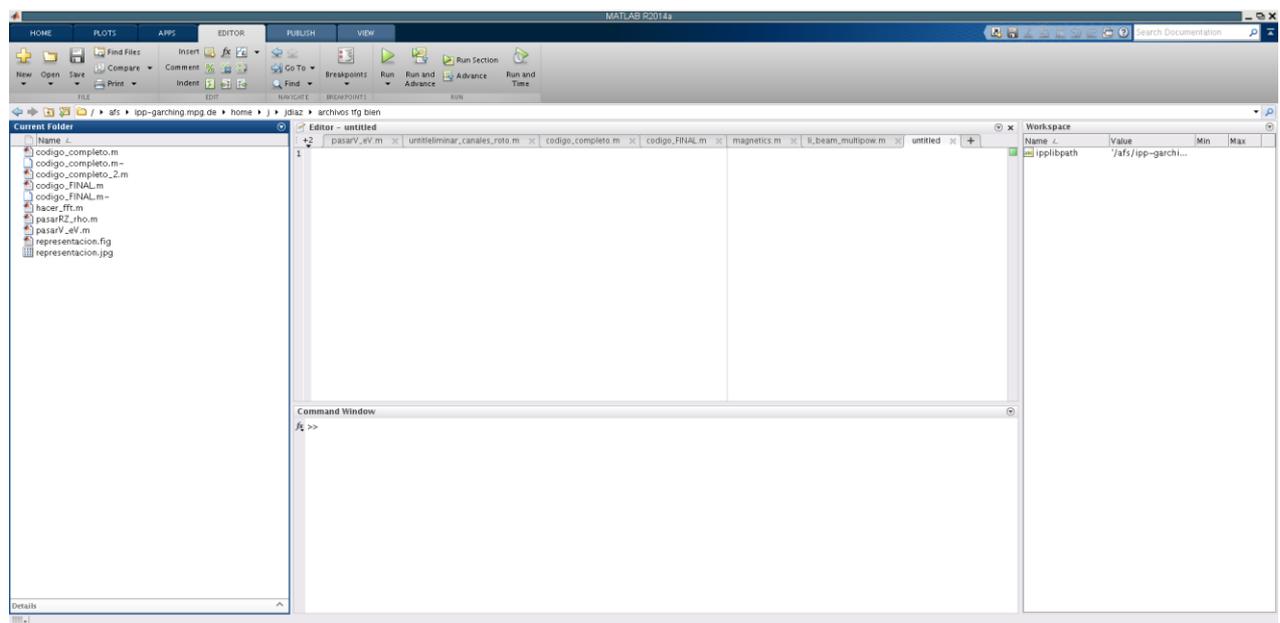


Figura 5.1.3. Interfaz de Matlab

Cabe destacar el uso de la plataforma ISIS o “*Interactive Shotfile Information System*” (figura 5.1.4). En esta base de datos del IPP quedan recogidos los archivos de cada uno de los “shot” que se han llevado a cabo. Estos datos son los que se han utilizado y leído en Matlab para la realización del código.

En su plataforma, para acceder a los archivos que hay en cada diagnostico solo hay que seleccionar el diagnostico en cuestión y la descarga de la que se quiere obtener los datos. En la práctica se ha utilizado los datos registrados en los diagnósticos CEC, RMC y RMD. Además dan unas especificaciones sobre el tipo de archivo, su longitud, unidades...

Una vez comprobado que archivo queremos leer en Matlab, había que concretar de qué tipo era para utilizar una u otra función para su lectura (las distintas funciones de lectura de “shot files” y como utilizarlas pueden verse en “help sf” de Matlab, únicamente en el referido al IPP).

ISIS

*Interactive Shotfile Information System
for ASDEX Upgrade Diagnostics*

Help... Browse the contents of a shotfile

Experiment
Diagnostics [Select...](#)
Shot (Leave blank for latest available shotfile)
Edition (Leave blank for last closed edition)
 Use previous available shotfile if there are no data for this shot

Help... List diagnostics for a specific shot

Show available diagnostics for shot from experiment
 List only the last edition for all available diagnostics
 List all available editions for all available diagnostics
 List only diagnostics with level-0 shotfiles (raw data)
 Output: compact informative

Figura 5.1.4. Base de datos de ISIS, donde se encuentran codificados los diferentes “shot files”

Una vez comentadas todas las herramientas utilizadas en la programación de MULTIPOW, se pasa a la explicación paso a paso de como se ha realizado el código, seguido de los resultados que se han obtenido. Como se ha dicho anteriormente, los resultados y toma de datos que se desarrollan a continuación están basados en la descarga “33138”. Sin embargo, el código puede ser utilizado para cualquier descarga existente. Únicamente se debe introducir al ejecutarlo un número de descarga distinto y existente. Al final del documento se representarán distintos resultados para otras descargas.

5.2. Programación de Multipow

La programación del código puede dividirse en tres partes diferenciadas, en las que se encuentran la lectura de datos desde la base del IPP y su posterior calibración, la transformación de las componentes R y Z en rho poloidal y eliminación de los canales sobrantes y por último la ejecución de la transformada de Fourier y la posterior representación de los resultados. El código completo con anotaciones se dejara adjunto en el material complementario a la memoria.

5.2.1. Lectura de datos y calibración de los mismos

La lectura de datos se lleva a cabo a través de funciones de Matlab explicadas en la ayuda “help sf”. El diagnóstico con el que se va a trabajar es el RMC, ya que éste posee una toma de datos mayor que el CEC durante un mismo instante de tiempo (el CEC tiene una frecuencia de medida de 8 KHz a diferencia del RMC, el cual posee una frecuencia de 1 GHz).

```
S1=sf2sig('RMC',shot,'Trad-A1',[time_start;time_end]);
T1=sf2tb('RMC',shot,'TIME-ADO',[time_start;time_end]);

S2=sf2sig('RMC',shot,'Trad-A2',[time_start;time_end]);
T2=sf2tb('RMC',shot,'TIME-AD1',[time_start;time_end]);
```

Figura 5.2.1.1. Utilización de la librería “sf” para leer los datos del diagnóstico RMC

Se puede observar en la figura 5.2.1.1 cómo se utilizan funciones de lecturas de archivos de descarga, almacenando sus valores en S1 y S2 (dónde se guardan valores de voltajes de los canales al medir temperatura, S1 del canal 1 al 30 y en S2 del 31 al 60) y en T1 y T2 (dónde se guardan los instantes de tiempo de cada una de las medidas descritas anteriormente). Para leer archivos que contengan señales se utiliza el comando “sf2sig” mientras que para leer archivos que contengan instantes de tiempo se utiliza “sf2tb”.

“Shot” hace referencia al disparo en cuestión, el cual ha sido introducido manualmente nada más ejecutar el programa, mientras que los tiempos de lecturas corresponden a un intervalo de tiempo en el que aparece un modo de vibración relativamente estable. Este intervalo de tiempo se obtiene de la herramienta SPECVIEW, como se puede ver en las figuras 5.2.1.2 y 5.2.1.3. Al introducir la descarga se representan los datos en función del tiempo y la frecuencia. En dicha representación buscaremos modos de vibración representativos, apuntando un intervalo de tiempo en el que alguno de ellos sea estable.

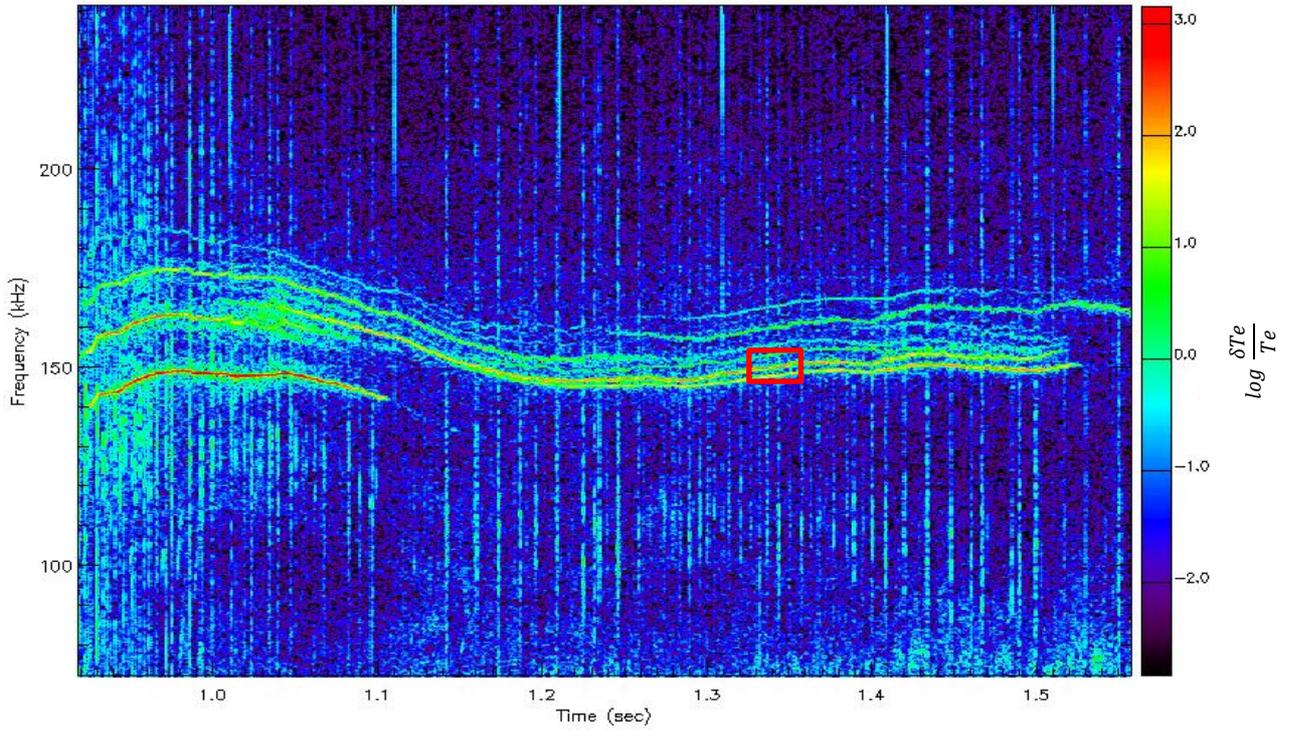


Figura 5.2.1.2. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, donde se representa la variación de la temperatura adimensional del plasma en escala logarítmica para distintas frecuencias en el tiempo

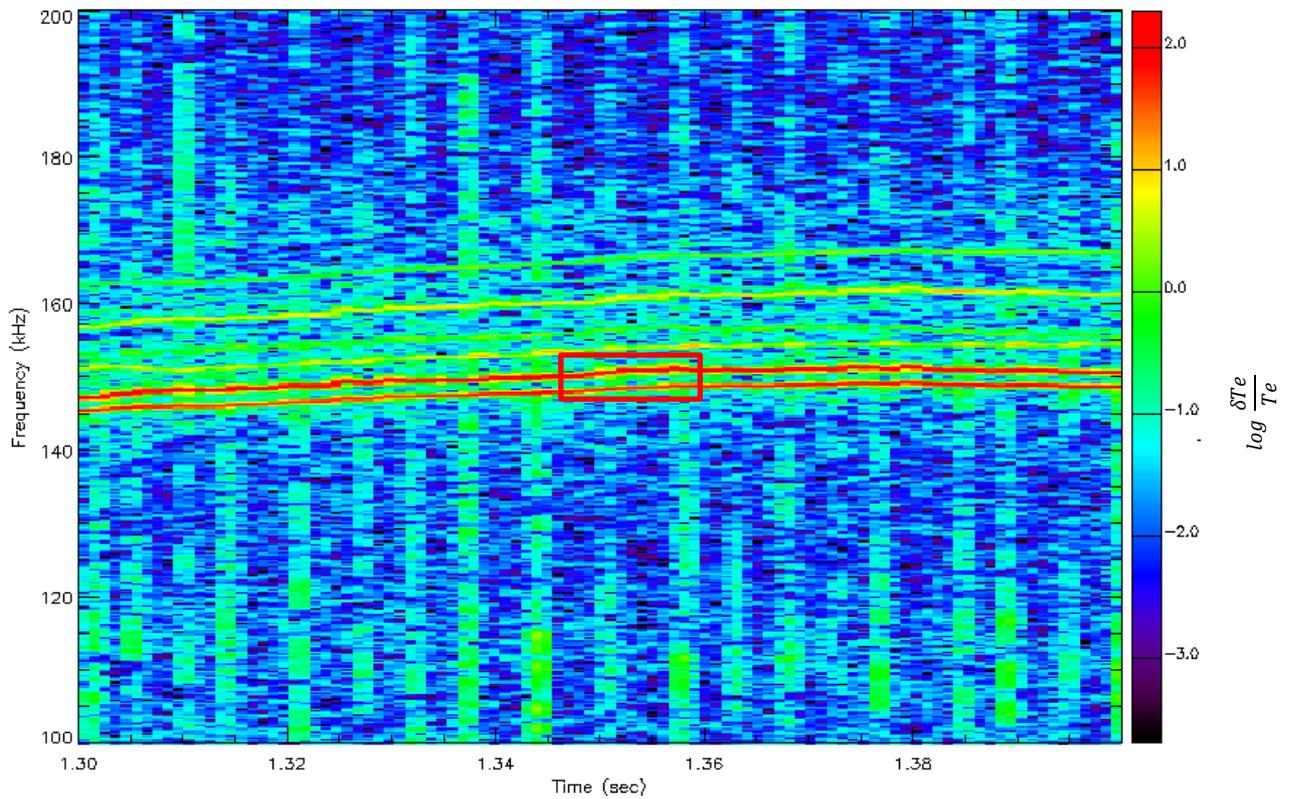


Figura 5.2.1.3. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle

Por ejemplo, para el caso del “shot” 33138, aparece un modo de vibración como el mostrado en la figura 5.2.1.3 en dicha frecuencia y momento. El instante de tiempo que tomaremos será de 1.350 a 1.351 al ser una zona donde el modo es estable. El intervalo de tiempo debe ser pequeño para que no empiecen a aparecer inestabilidades, sin embargo, cuanto más pequeño es, menor será el número de datos leídos.

Una vez se ha leído los datos del RMC, se pasan dichos datos a valores de temperatura (keV), ya que tal y como se han leído están en valores de voltaje que manda el aparato al sistema. Esta calibración ya viene implementada en el diagnostico CEC, pero no en el RMC. Para llevar a cabo la calibración necesitaremos datos contenidos en el diagnostico RMD.

```
H1=sf2par('RMD',shot,'MULTIA00','eCAL-A1');
H2=sf2par('RMD',shot,'MULTIA00','eCAL-A2');

SH1=sf2par('RMD',shot,'SHIFTB00','eCAL-A1');
SH2=sf2par('RMD',shot,'SHIFTB00','eCAL-A2');

for i=1:length(S2.value(1,:))
    for j=1:length(S2.value(:,1))
        S1.value(j,i)=S1.value(j,i)*H1.value(i,1)+SH1.value(i,1);
        S2.value(j,i)=S2.value(j,i)*H2.value(i,1)+SH2.value(i,1);
    end
end
```

Figura 5.2.1.4. Calibración de los datos de RMC

Como se puede ver en la figura 5.2.1.4, la calibración se realiza utilizando los archivos SHIFTB00 y MULTIA00 del diagnóstico RMD, mediante la ecuación para la calibración expuesta, obtenida de los archivos de datos del IPP (figura 5.2.1.5). Para calibrar los primeros 30 canales se utiliza los archivos pertenecientes al grupo cal-A1, mientras que para los otros 30 se utilizara el grupo de archivos cal-A2. Tras la calibración y mediante un bucle “for”, los valores de las dos matrices se unirán formando una única matriz de 60 canales.

Channels 1-30
 $\text{Trad-A1};i \text{ (eV)} = \text{Trad-A1};i \text{ (V)} * \text{MULTIA00};i + \text{SHIFTB00};i \quad \text{for } i=1,\dots,30$
 where MULTIA00 and SHIFTB00 are signals obtain the signal GROUP **cal-A1**

Channels 31-60
 $\text{Trad-A2};i \text{ (eV)} = \text{Trad-A2};i \text{ (V)} * \text{MULTIA00};i + \text{SHIFTB00};i \quad \text{for } i=1,\dots,30$
 where MULTIA00 and SHIFTB00 are signals obtain the signal GROUP **cal-A2**

Figura 5.2.1.5 Ecuación utilizada en la calibración

En la figura 5.2.1.6 se representa la media de dichas temperaturas para cada uno de los canales.

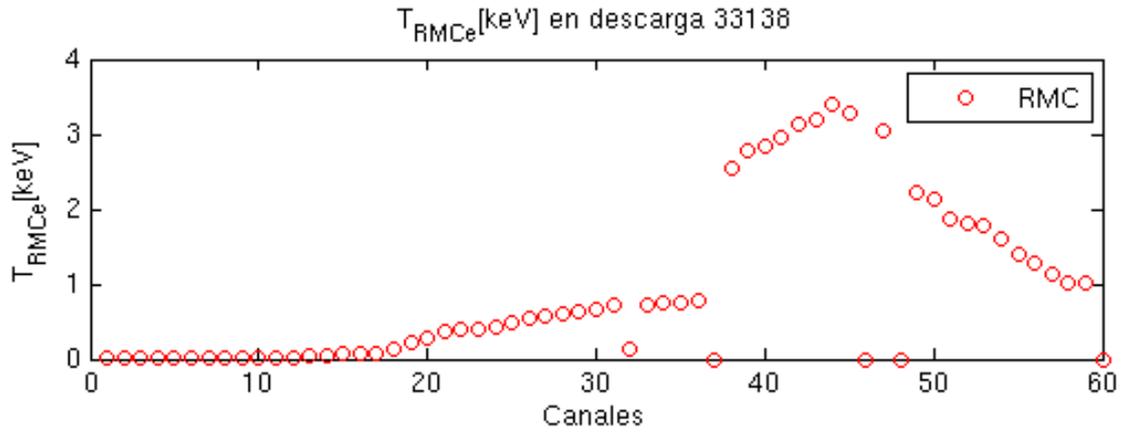


Figura 5.2.1.6. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales del diagnóstico RMC

Hay canales en los que la temperatura es nula. Esto puede deberse a que dichos canales han sido desactivados durante la descarga o no funcionan como deberían. Más adelante se realizará un filtrado para eliminar estos canales que no funcionan.

Una vez que se tienen las temperaturas del diagnóstico RMC para cada uno de los canales, se van a comparar dichos datos con los que están contenidos en el CEC para el mismo “shot”. Para ello se procederá a leer los datos del CEC al igual que se hizo al principio y, sin necesidad de calibrar, y se representara en la figura 5.2.1.7 la media de sus valores para cada uno de los canales, al igual que en la figura anterior.

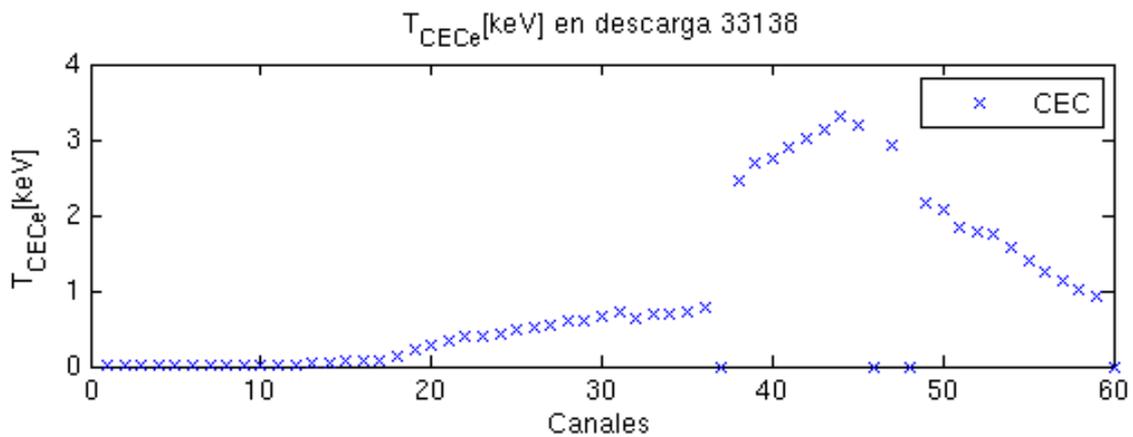


Figura 5.2.1.7. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales del diagnóstico ECE

Superponiendo ambas imágenes se comprueba la similitud entre ambos diagnósticos en la figura 5.2.1.8, en cuanto a la temperatura media registrada por cada canal.

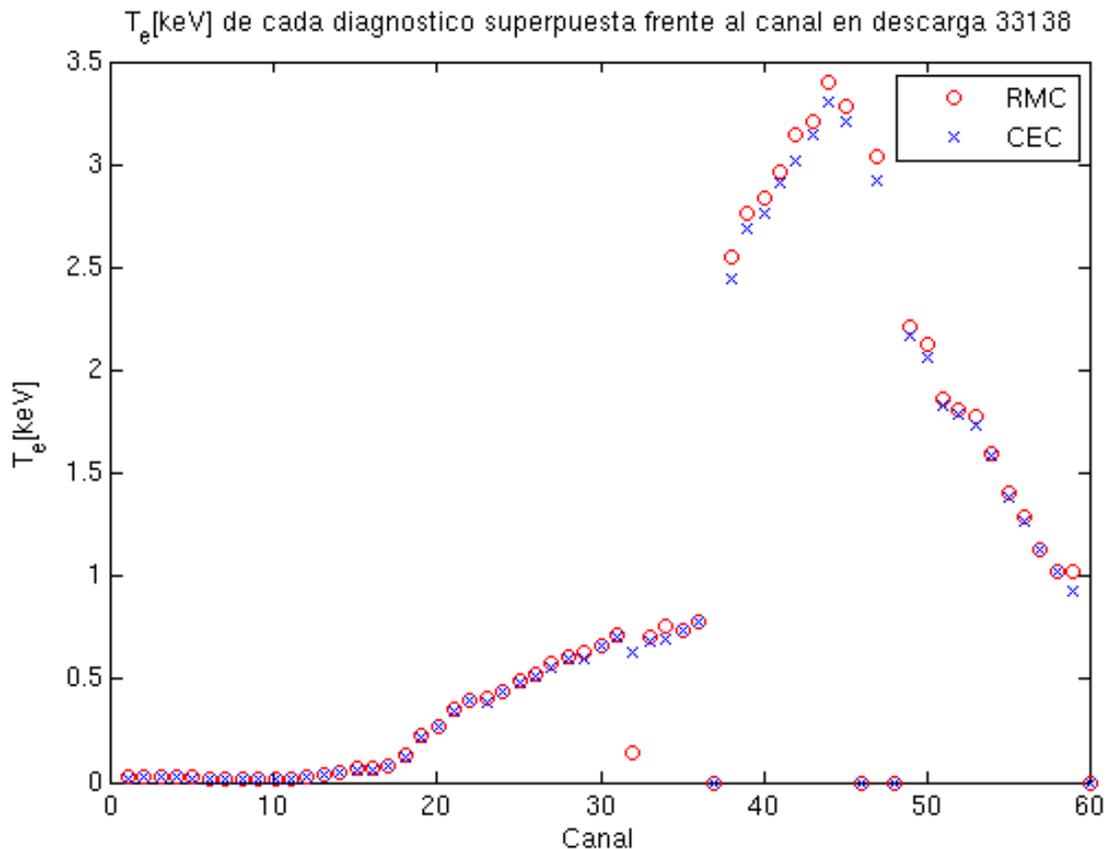


Figura 5.2.1.8. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales de los diagnósticos RMC y ECE superpuestos

Como se puede observar, la coincidencia es prácticamente total. Existen pequeñas diferencias entre una y otra, sin embargo son tan pequeñas que no suponen un fallo en la lectura. Con esto se puede comprobar que la calibración de los diagnósticos se ha realizado satisfactoriamente.

5.2.2. Cálculo de la rho poloidal a partir de R y Z y eliminación de canales defectuosos

Una vez se tienen los valores de temperatura para cada uno de los canales a estudiar, se pasará a obtener las coordenadas magnéticas del problema.

Se comienza leyendo los “shot file” que contienen las coordenadas R y Z para cada uno de los canales anteriores (la explicación de estas variables y de los canales se da en el apartado 4.3). Se ha tomado las posiciones del diagnóstico CEC siendo “R-A” las posiciones de cada uno de los canales en R y “Z-A” la posición de cada uno en Z.

```
R=sf2sig('CEC',shot,'R-A',[time_start;time_start]);
Z=sf2sig('CEC',shot,'z-A',[time_start;time_start]);

[tmp, error_code]=kkMap('rzPFn',[R.value;Z.value],diag,shot);
```

Figura 5.2.2.1. Lectura de los datos de R y Z y posterior obtención de rho poloidal

Una vez se tienen registrados los datos de R y Z, se pasa al cálculo de rho poloidal a partir de los mismos. Para ello se utiliza la librería “kkmap”, a partir de la cual se obtiene dicha rho. Para ello se debe introducir qué queremos obtener (“rzPFn” indica que introduciendo R y Z nos va a devolver rho poloidal), los valores de R y Z, el “shot” (sigue siendo el 33138) y por último el diagnostico a utilizar, en nuestro caso para Multipow se utilizará el diagnostico ‘EQI’ como modo de reconstrucción del equilibrio magnético. Todo lo descrito se observa en la figura 5.2.2.1.

Una vez que se tienen los valores de rho poloidal registrados, se representará estos con respecto a los canales a los que están asignados, para ordenarlos a posteriori de menor a mayor rho poloidal, como se representan en la figura 5.2.2.2.

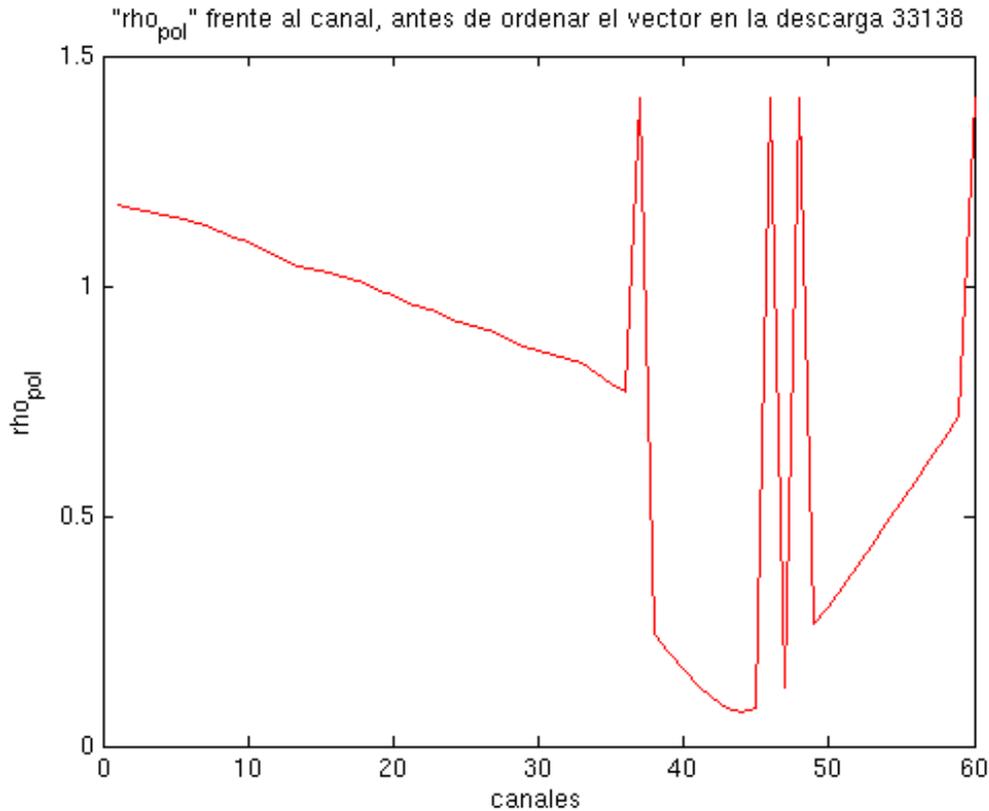


Figura 5.2.2.2. Valores de rho poloidal para los diferentes canales del diagnóstico CEC

Para ordenar dichos canales, primero se crea una nueva matriz de dos filas, la primera con los datos de rho poloidal, y en la segunda con una serie de números del 1 al 60. Estos números representan los canales en sí, siendo el 1 referido al canal 1, el 2 para el 2... Tras esto se utiliza la librería “sort”, la cual ordena un vector en función del orden de menor a mayor de las componentes de otro. Con ello se ordena la segunda fila de la matriz anterior, quedando un vector con los números de los canales ordenados de menor a mayor rho poloidal. Tras esto solo falta ordenar la rho poloidal de menor a mayor. El vector de los canales ordenados se utiliza para marcar las componentes a cambiar en la matriz de valores de temperatura. Todo lo descrito en este párrafo se muestra como código en la figura 5.2.2.3.

```
rho_channel=zeros(2,length(outputrhoPF));

for i=1:length(outputrhoPF)
    rho_channel(1,i)=outputrhoPF(i);
    rho_channel(2,i)=i;
end

[rho_channel,channel_ord]=sort(rho_channel(1,:));

for i=1:length(outputrhoPF)
    [menor,k]=min(outputrhoPF(i:end));
    outputrhoPF((i-1)+k)=outputrhoPF(i);
    outputrhoPF(i)=menor;
end

for i=1:length(Sfinal(1,:))
    Sfinal_ord(:,i)=Sfinal(:,channel_ord(i));
end
```

Figura 5.2.2.3. Ordenación de los canales y valores según rho poloidal de menor a mayor

Tras esto, se vuelven a comparar los valores de las temperaturas entre los diagnósticos RMC y CEC, pero esta vez según su rho poloidal. Como se ve en la figura 5.2.2.4, la compilación del código en este apartado sigue siendo buena al seguir coincidiendo prácticamente los valores de ambas en distintas rho poloidales.

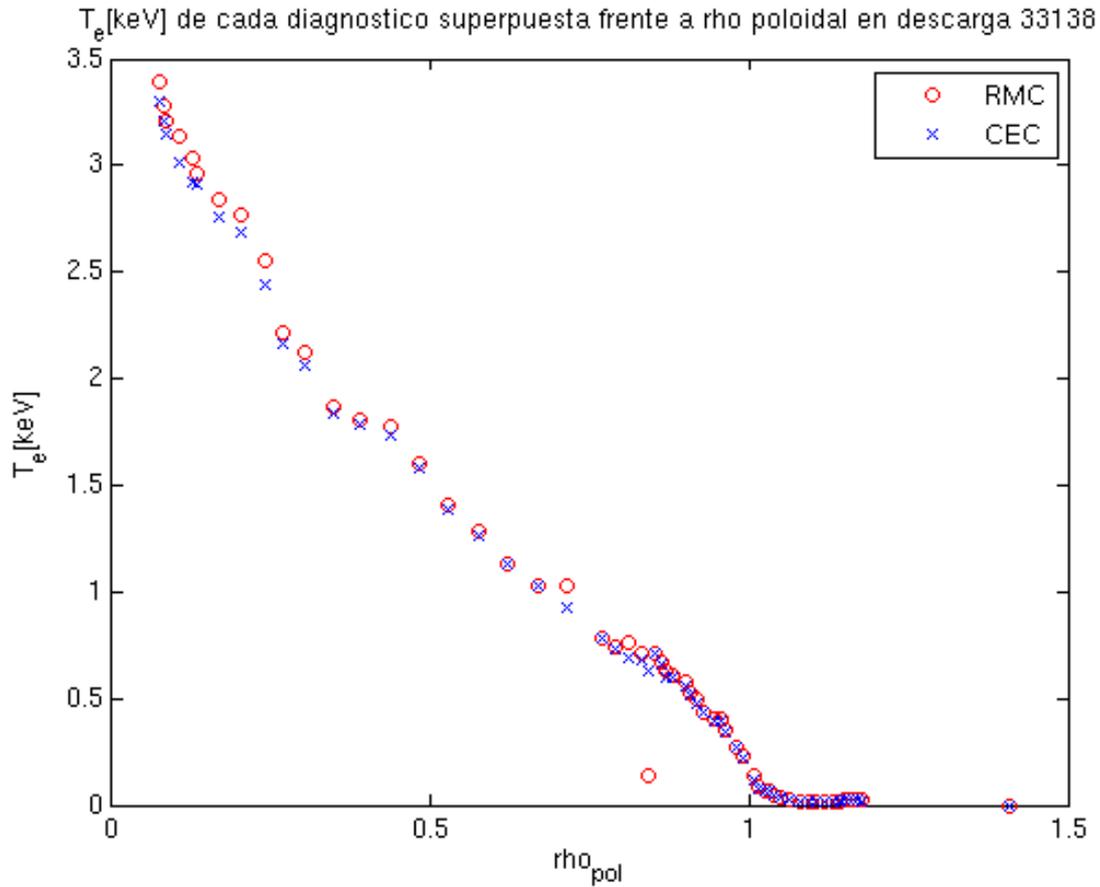


Figura 5.2.2.4. Representación de la temperatura electrónica en función de rho poloidal para los diagnósticos RMC y ECE superpuestos

Otra comprobación a tener en cuenta sería la utilización de la herramienta DIAGGEOM, ya que ésta puede mostrar la posición en rho de los canales de medida para una descarga dada. Pasando por cada uno de los puntos representados en la figura 5.2.2.5, de menor a mayor rho poloidal, se muestra a que canal corresponde en cada caso, y comparando luego con el resultado de reordenar los canales en el código. Si coincide el orden de los canales en ambos caso es clara señal de que la compilación ha sido satisfactoria.

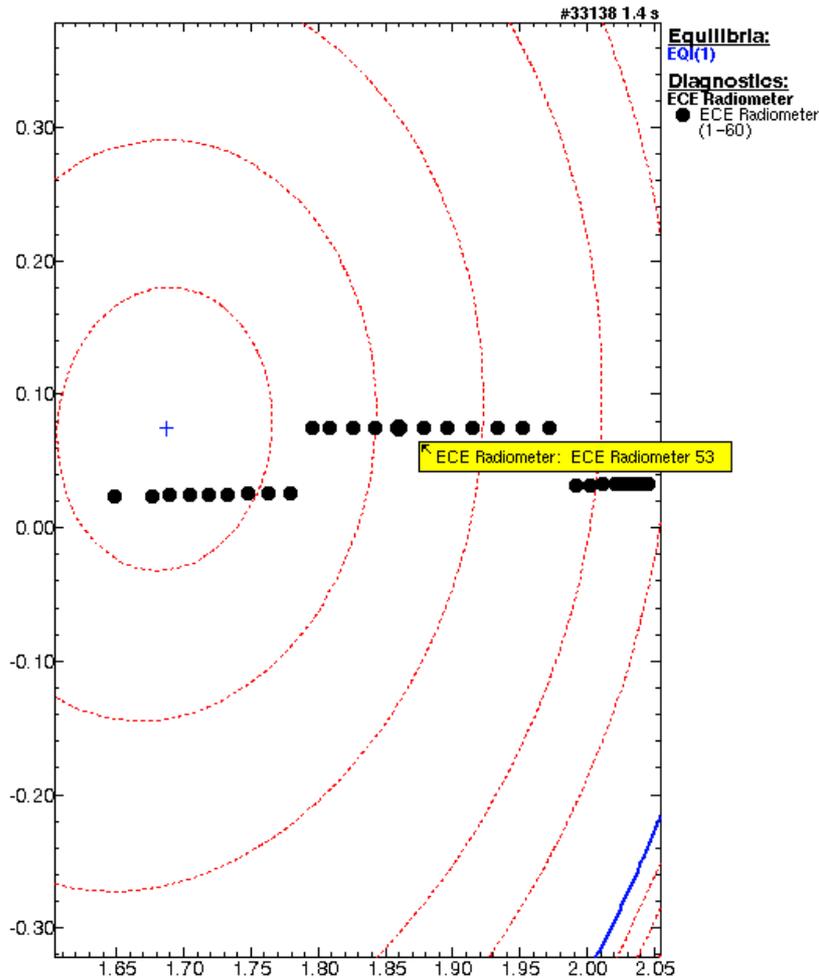


Figura 5.2.2.5. Comprobación de los canales canales asignados según rho poloidal mediante el uso de la herramienta Diageom

Por ahora se tienen los valores de temperatura en el intervalo de tiempo introducido y asignados cada uno de ellos a un valor rho poloidal. El siguiente paso será el de eliminar los canales que no funcionen o den malos datos para tener una representación limpia de errores (figura 5.2.2.6).

Se tomarán como canales con error a aquellos que proporcionen datos nulos o constantes durante todo el intervalo de tiempo estudiado. En estos casos se eliminará tanto los valores de temperatura como los valores de rho poloidal a los que están sujetos.

```

for i=2:length(Sfinal_ord(1,:))
    if max(Sfinal_ord(:,i))==min(Sfinal_ord(:,i));
        j=i-k;
        Sfinal_ord_sinroto(:,j)=[];
        channel_ord_sinroto(j)=[];
        outputrhoPF_sinroto(j)=[];
        Sfinalcec_ord_sinroto(:,j)=[];
        k=k+1;
    end
end
end

```

Figura 5.2.2.6. Eliminación de los canales “rotos” o con fallo de medida

Únicamente con la condición de que el máximo y el mínimo de la lista de valores para un canal sean iguales, se puede englobar las dos condiciones descritas. Así quedará una matriz de menor número de columnas, ya que se ha eliminado las que no funcionaban correctamente.

A continuación, en las figuras 5.2.2.7 y 5.2.2.8 se representan los valores de temperatura para los canales y rho respectivamente, igual que en las figuras 5.2.1.8 y 5.2.2.4, sin embargo en estos casos ya se han eliminado los canales que no funcionan correctamente.

T_e [keV] de cada diagnostico superpuesta frente al canal sin canales rotos en descarga 33138

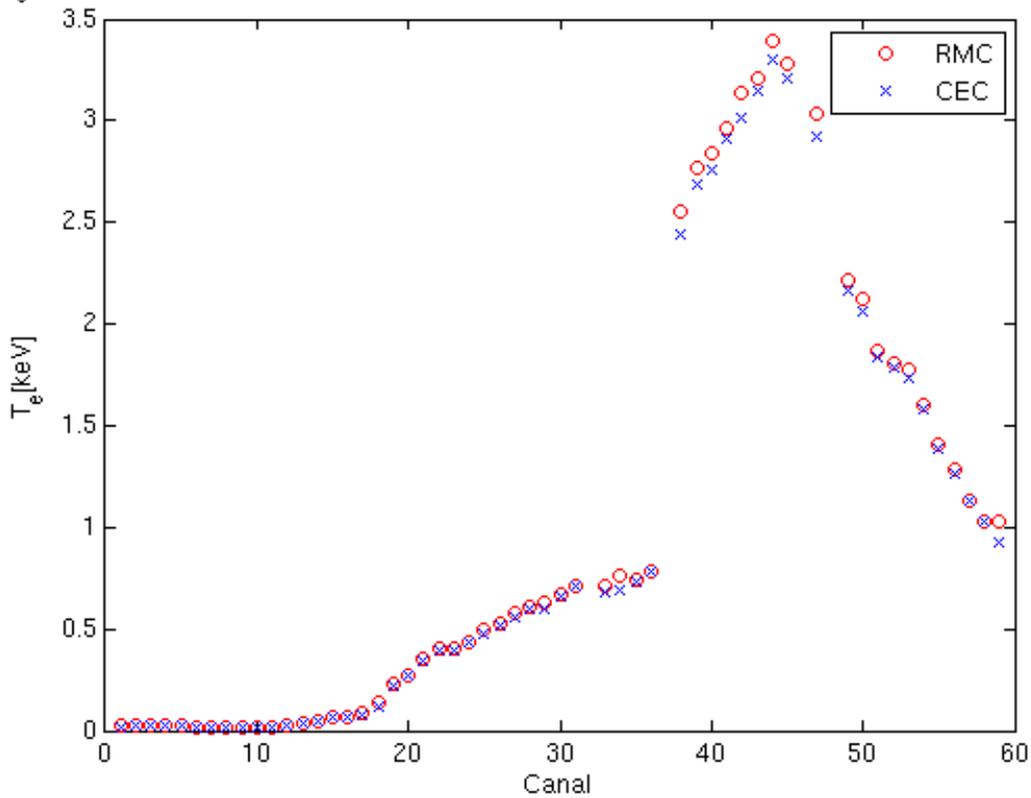


Figura 5.2.2.7. Representación de la temperatura electrónica en función de los canales de los diagnósticos RMC y ECE superpuestos, una vez eliminado los canales que fallaban

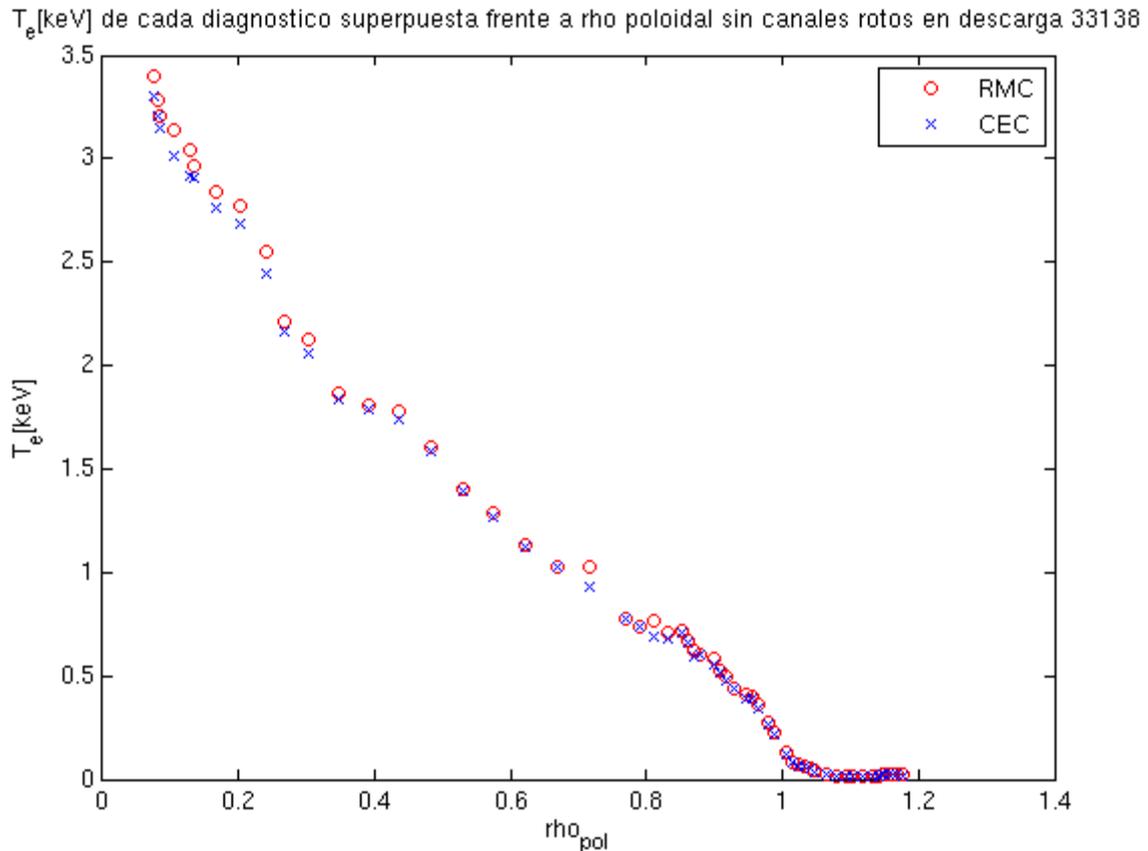


Figura 5.2.2.8. Representación de la temperatura electrónica en función de rho poloidal de los diagnósticos RMC y ECE superpuestos, una vez eliminado los canales que fallaban

5.2.3. Transformada de Fourier y representación

Por último, se llevará a cabo una transformada de Fourier a los datos de temperatura resultantes del paso anterior, con el objetivo de facilitar su estudio al eliminar las dificultades producidas por su no linealidad. Además, la mayor facilidad para visualizar los modos de vibración, tanto TAEs como RSAEs, en función de la frecuencia hace aún más útil la utilización de dicha herramienta.

La transformada de Fourier se realizará tras eliminar los valores de temperatura erróneos y ordenarlos, tras dividir los mismos entre la media de ellos, dejándolos así en forma adimensional (figura 5.2.3.1). Cabe destacar que en la realización de la FFT hay que desechar la mitad de los datos resultantes debido a que son simétricos a la otra mitad. Por lo tanto, si existen 1000 valores de temperaturas tomados en 1 milisegundo, tras la FFT únicamente quedarán 500 valores para representar.

```
Sfft=zeros(length(Sfinal_ord),length(channel_ord_sinroto));

for i=1:length(channel_ord_sinroto)
    Sfft(:,i)=fft(Sfinal_ord_sinroto(:,i)/mean(Sfinal_ord_sinroto(:,i)));
end

Sfft_final=Sfft(2:(length(Sfft)-1)/2+1,:);
```

Figura 5.2.3.1. Realización de la transformada de Fourier

Pasamos a la parte de la representación. En esta parte se ha propuesto realizar una serie de modificaciones en la representación habitual para una mayor utilidad del código.

La primera es añadir un filtro de los ejes, planteando únicamente los intervalos de frecuencia y rho que el usuario desee. Para ello, justo antes de la representación, el programa pregunta al individuo en que intervalos quiere que represente. Una vez elegido los rangos, se eliminan los valores innecesarios para la representación y sólo se representa lo deseado. El código para realizar este filtrado se expone en la figura 5.2.3.2.

```

j=1;

for i=1:length(frec)
    if frec(i)>=frec_start
        if frec(i)<=frec_end
            cont1(j)=i;
            new_frec(j)=frec(i);
            j=j+1;
        end
    end
end

j=1;

for i=1:length(outputrhoPF_sinroto)
    if outputrhoPF_sinroto(i)>=rho_start
        if outputrhoPF_sinroto(i)<=rho_end
            cont2(j)=i;
            new_outputrhoPF_sinroto(j)=outputrhoPF_sinroto(i);
            j=j+1;
        end
    end
end

```

Figura 5.2.3.2. Elección de rangos de frecuencia y rho a representar

La segunda modificación será la de representar los valores de la transformada en escala logarítmica, lineal o de raíz cuadrada (figura 5.2.3.3). Para ello, se ejecuta un “input”, en el que dependiendo del número que introduzcamos hará la representación en alguna de estas escalas. Por ejemplo, si se introduce un 1, la representación se hará en escala logarítmica, calculando el programa el logaritmo de todos los valores resultantes de la FFT antes de su representación.

```

[X,Y]=meshgrid(new_outputrhoPF_sinroto,new_frec);

fprintf('Elegir el tipo de escala\nLog=1   Lineal=2   Raiz=3\n');
escala=input('Numero de escala: ');

if escala==1
    figure('color',[1 1 1]);
    filtro_escala1=fspecial('gaussian');
    Sfft_final=imfilter(Sfft_final,filtro_escala1);
    contourf(X,Y,log(Sfft_final(min(cont1):max(cont1),min(cont2):max(cont2))));
    title(['FFT (ESCALA LOG) frente a rho_p_o_1 ordenada "limpia" de canales de medida incorrecta
    xlabel('rho_p_o_1');
    ylabel('frecuencia (kHz)');
    zlabel('Log');
end

if escala==2
    figure('color',[1 1 1]);
    filtro_escala2=fspecial('gaussian');
    Sfft_final=imfilter(Sfft_final,filtro_escala2);
    contourf(X,Y,Sfft_final(min(cont1):max(cont1),min(cont2):max(cont2)));
    title(['FFT (ESCALA LINEAL) frente a rho_p_o_1 ordenada "limpia" de canales de medida incorrec
    xlabel('rho_p_o_1');
    ylabel('frecuencia (kHz)');
    zlabel('Lin');
end

if escala==3
    figure('color',[1 1 1]);
    filtro_escala3=fspecial('gaussian');
    Sfft_final=imfilter(Sfft_final,filtro_escala3);
    contourf(X,Y,sqrt(Sfft_final(min(cont1):max(cont1),min(cont2):max(cont2))));
    title(['FFT (ESCALA SQRT) frente a rho_p_o_1 ordenada "limpia" de canales de medida incorrecta
    xlabel('rho_p_o_1');
    ylabel('frecuencia(kHz)');
    zlabel('Sqrt');
end

```

Figura 5.2.3.3. Elección de escala a representar (logarítmica, lineal, raíz)

Finalmente, el resultado será la representación del programa Multipow, a través del cual se muestra la evolución de la temperatura para las distintas rhos y frecuencias. En esta representación se puede identificar los modos de vibración de forma sencilla. Cabe destacar la utilización de algún filtro para eliminar el ruido de las siguientes imágenes (por ejemplo, la utilización del filtro gaussiano), además de que la selección de colores en la representación ha sido proporcionada para tener los mismos tonos que los utilizados en el IPP.

A continuación se adjunta una serie de imágenes del resultado final para el shot “33138” en los instantes de tiempo indicados al inicio del capítulo, cada una para una escala distinta (logarítmica en la figura 5.2.3.4, lineal en la figura 5.2.3.5 y raíz cuadrada en la figura 5.2.3.6).

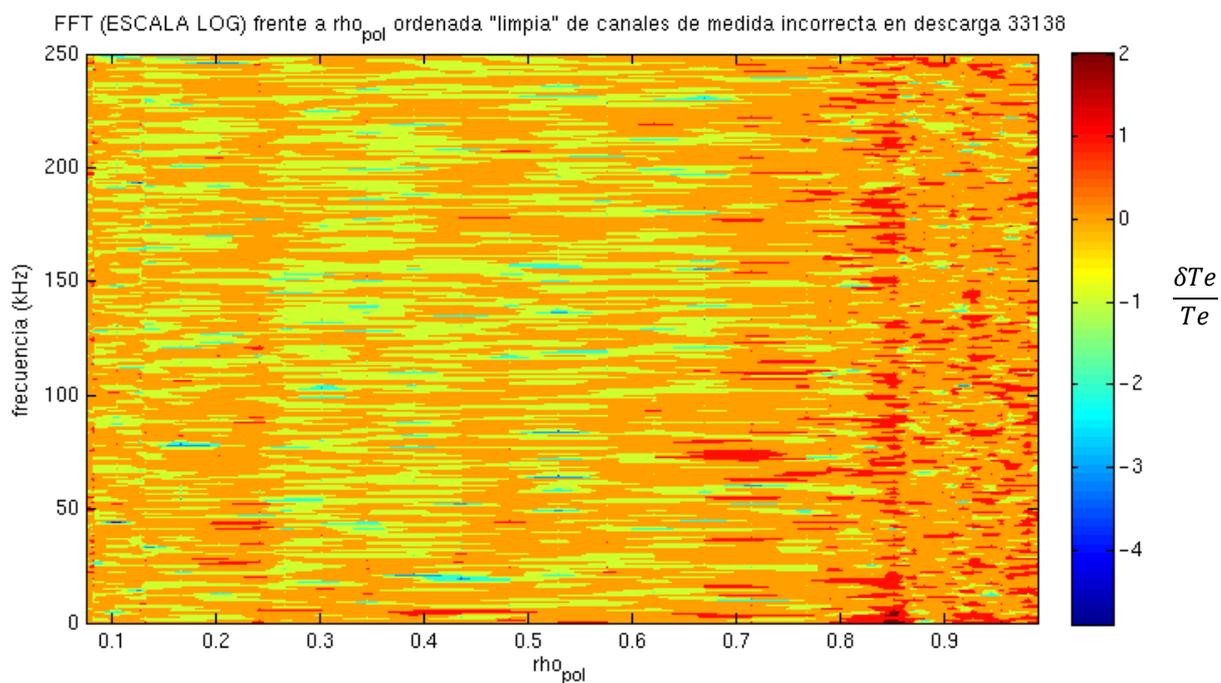


Figura 5.2.3.4. Representación de la FFT de temperatura en escala logarítmica (Multipow)

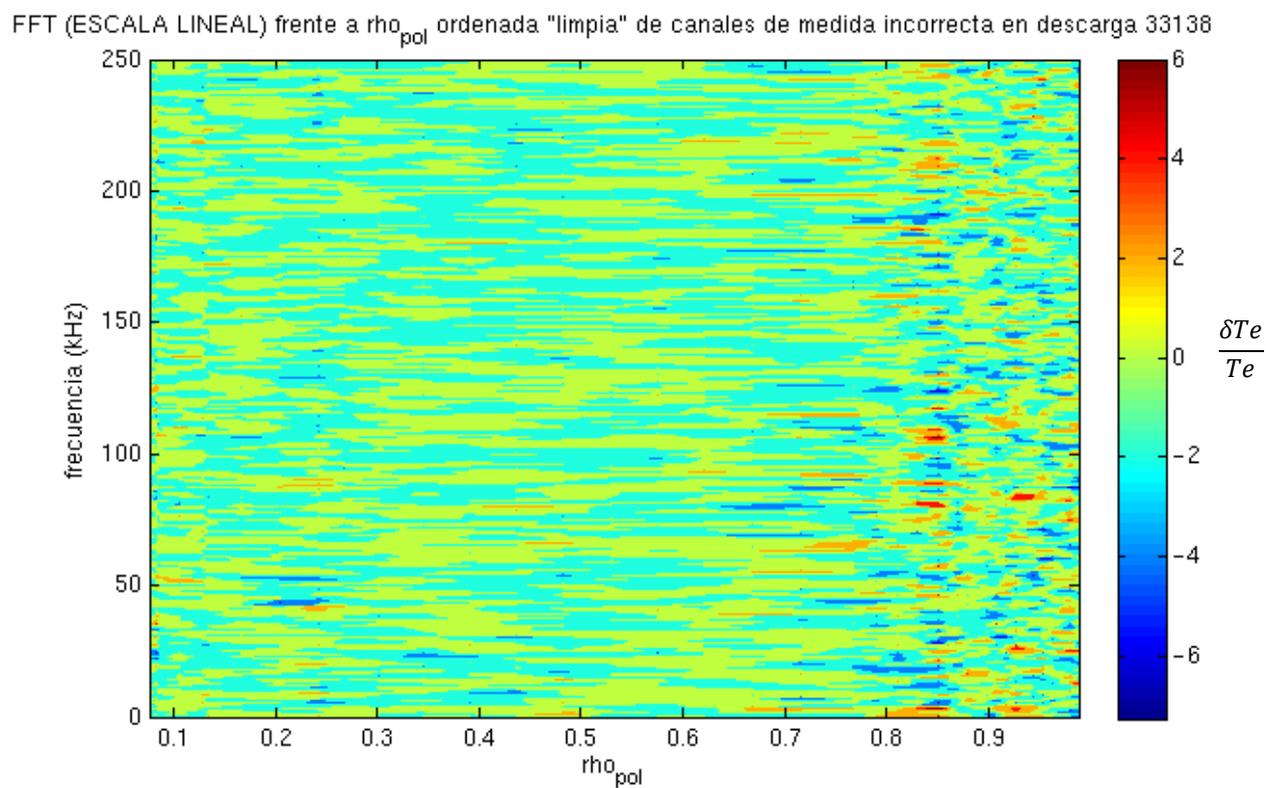


Figura 5.2.3.5. Representación de la FFT de temperatura en escala lineal (Multipow)

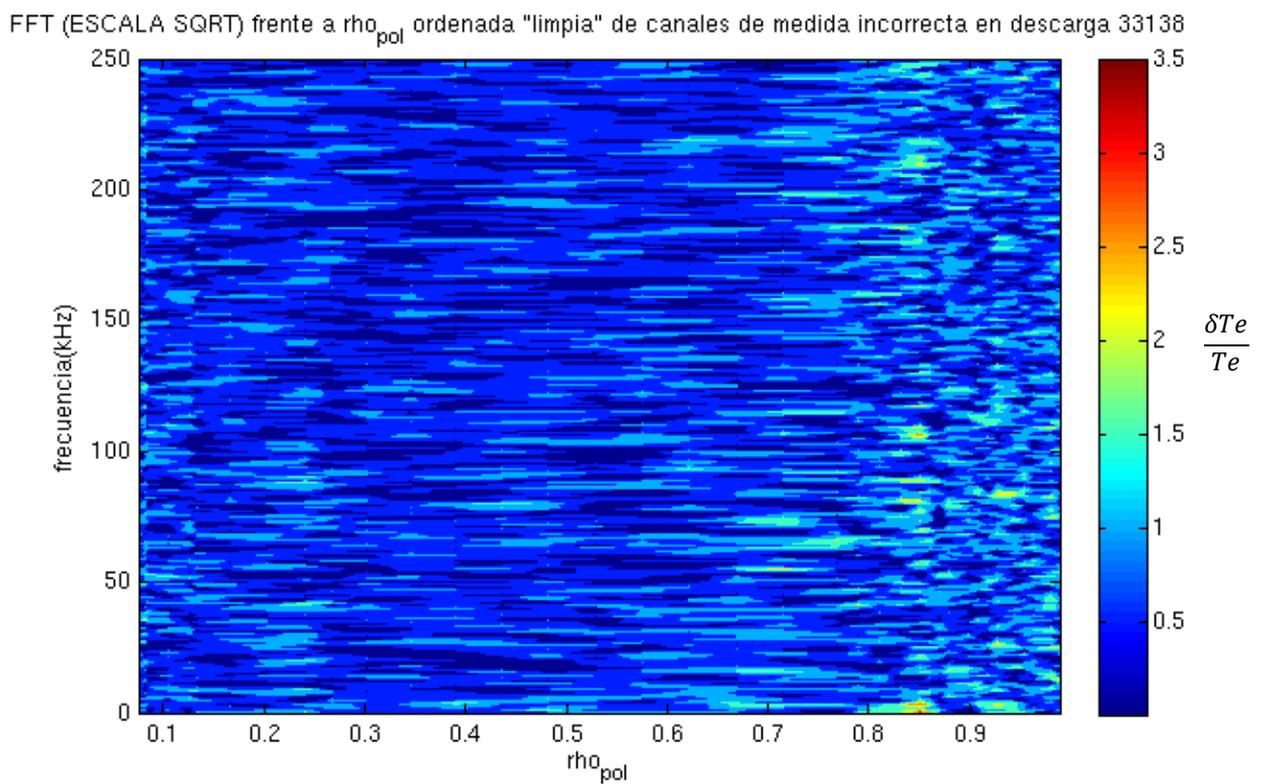
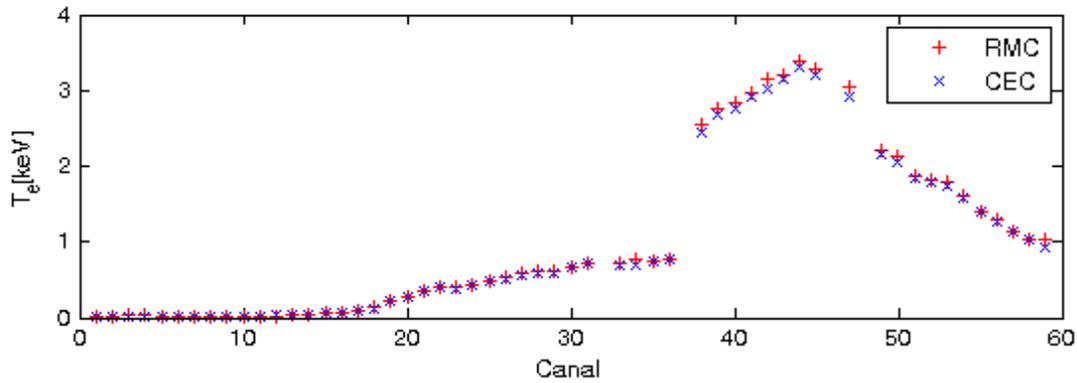


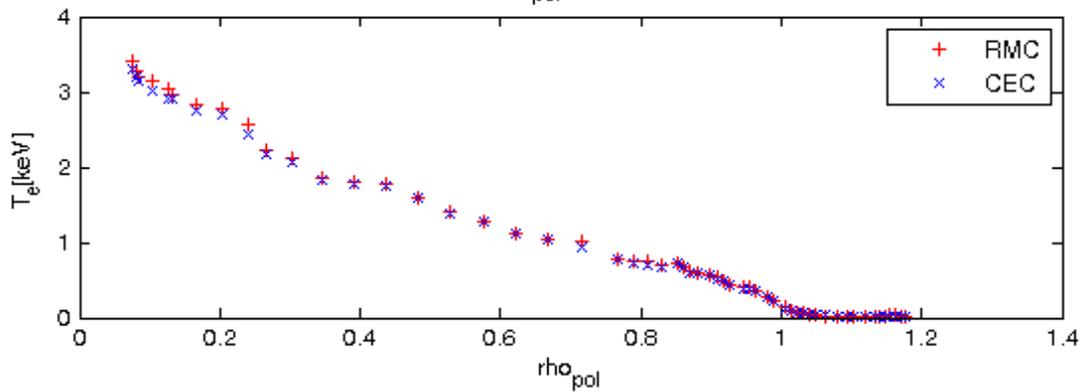
Figura 5.2.3.6. Representación de la FFT de temperatura en escala de raíz cuadrada (Multipow)

Para una mayor visualización de los resultados obtenidos, se realiza una agrupación final, mediante una función "subplot", de las figura 5.2.2.7, 5.3.2.8 y 5.2.3.4 dando como resultado para la descarga "33138" la figura 5.2.3.7.

T_e [keV] de cada diagnostico superpuesta frente al canal (sin canales de medida incorrecta) en descarga 33138



T_e [keV] de cada diagnostico superpuesta frente ρ_{pol} (sin canales de medida incorrecta) en descarga 33138



FFT (ESCALA LOG) frente a ρ_{pol} ordenada 'limpia' de canales de medida incorrecta en descarga 33138

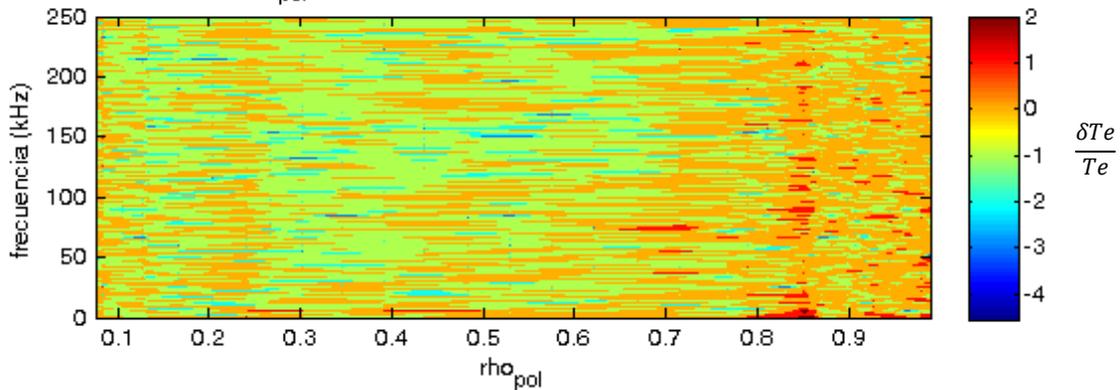


Figura 5.2.3.7. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.

Por último se mostrarán los resultados de la figura 5.2.3.7 para otras descargas, sin entrar tan en detalle en la evolución de su programación como con la anterior.

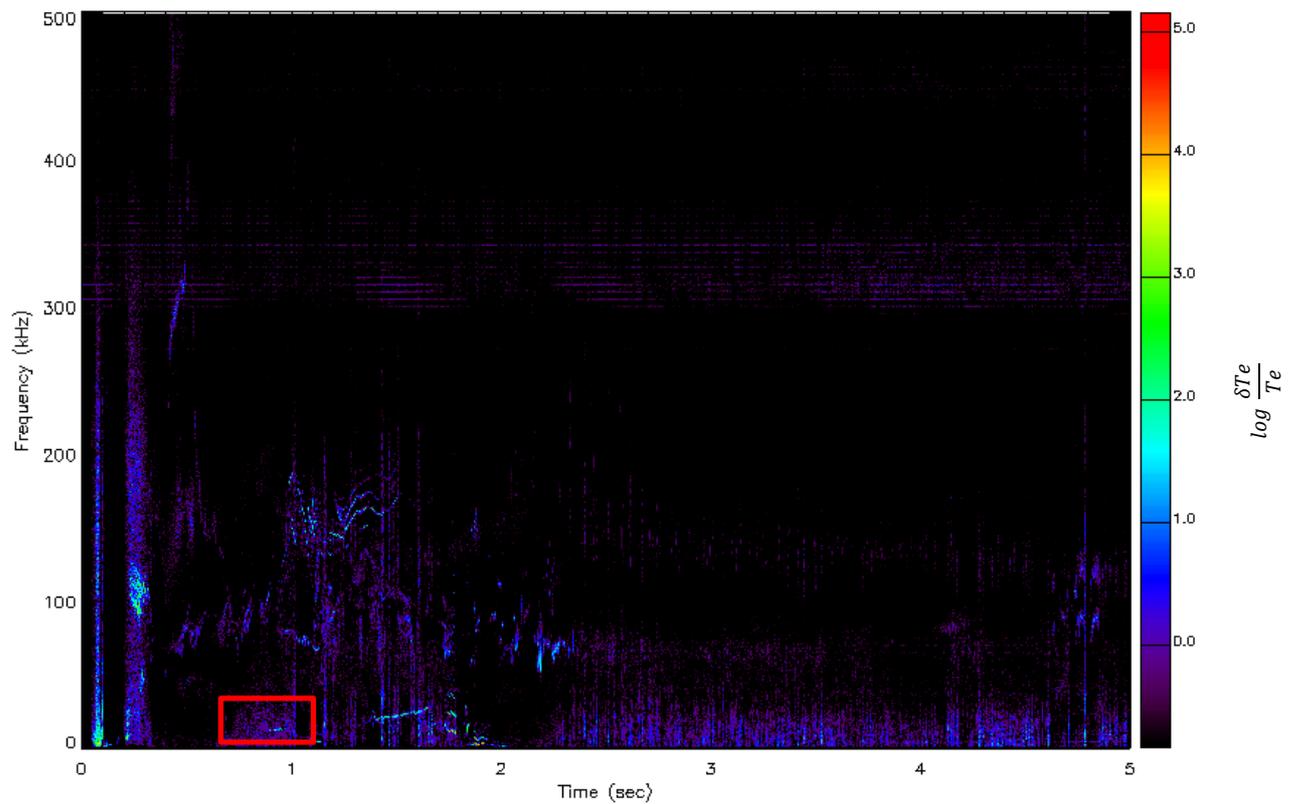
“Shot” 32318:

Figura 5.2.3.8. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, dónde se representa la evolución de la temperatura para distintas frecuencias en el tiempo

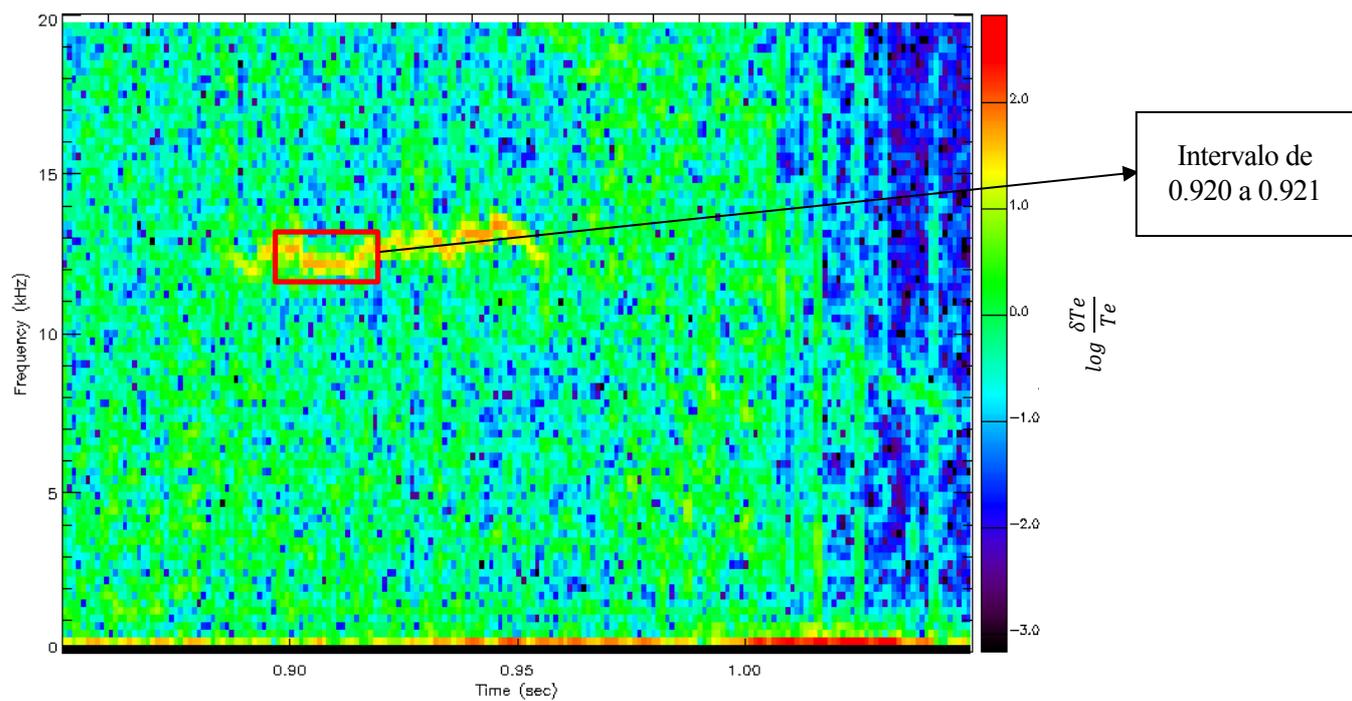


Figura 5.2.3.9. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle

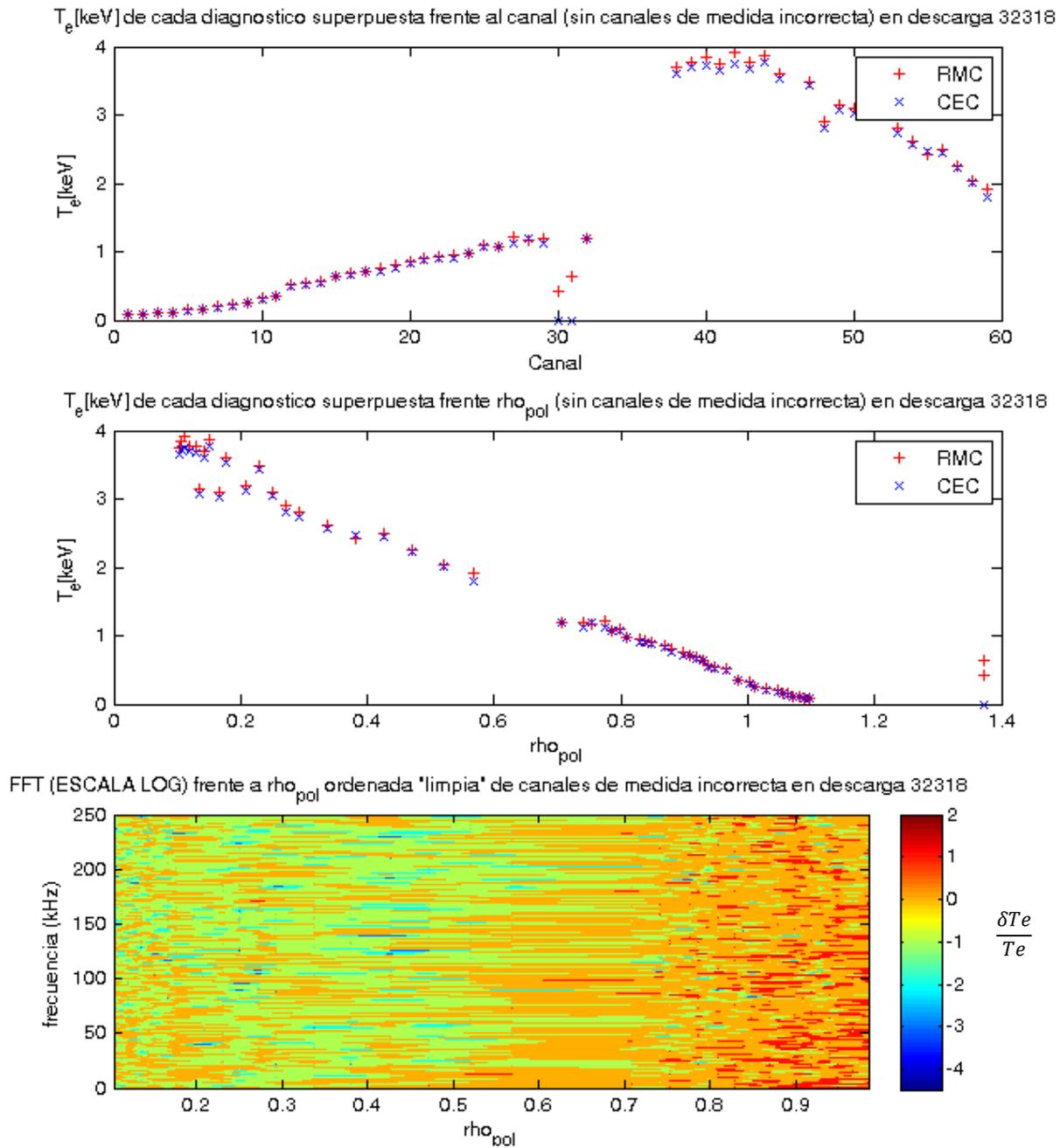


Figura 5.2.3.10. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.

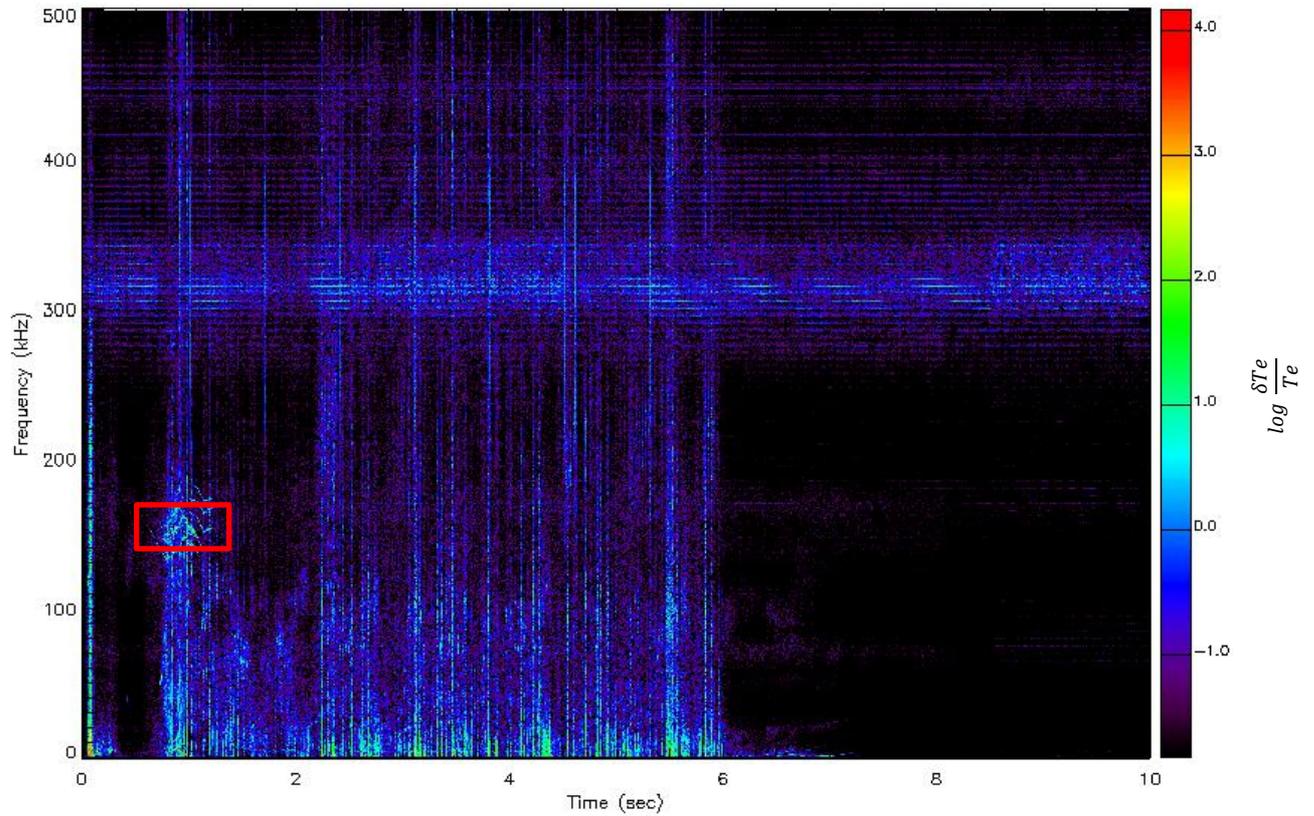
“Shot” 33147:

Figura 5.2.3.11. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, dónde se representa la evolución de la temperatura para distintas frecuencias en el tiempo

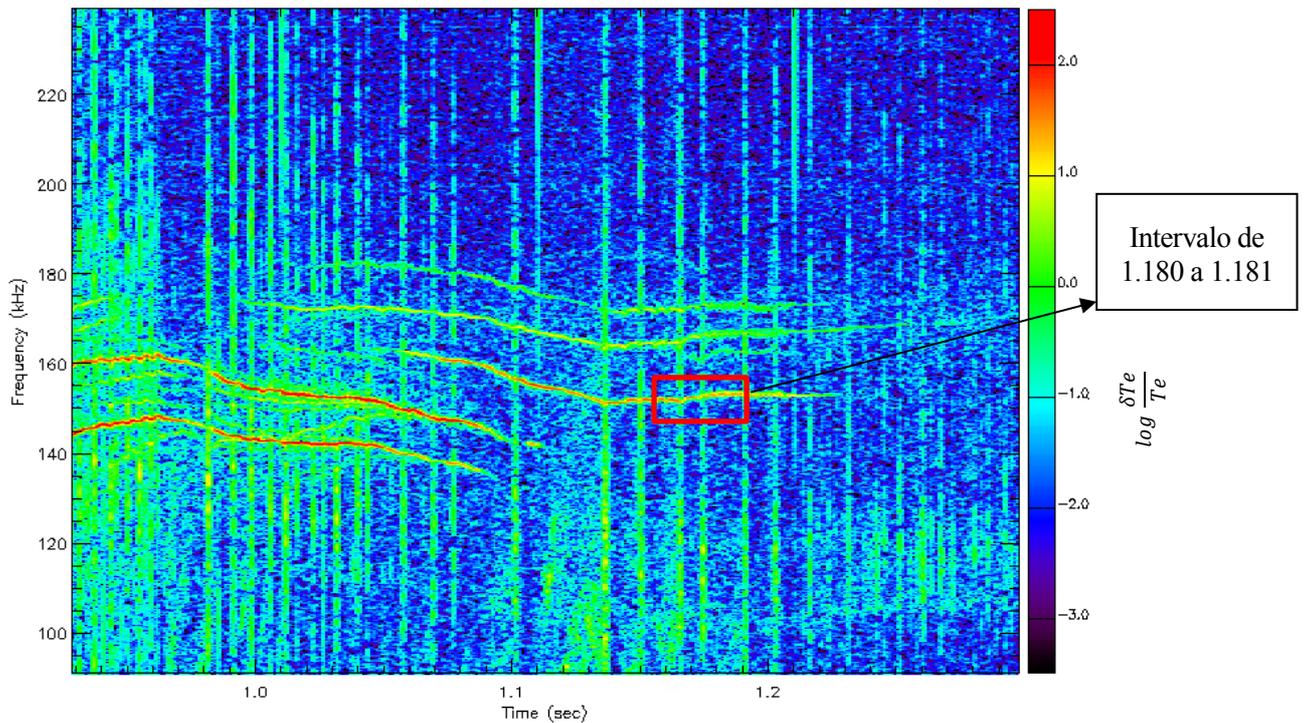


Figura 5.2.3.12. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle

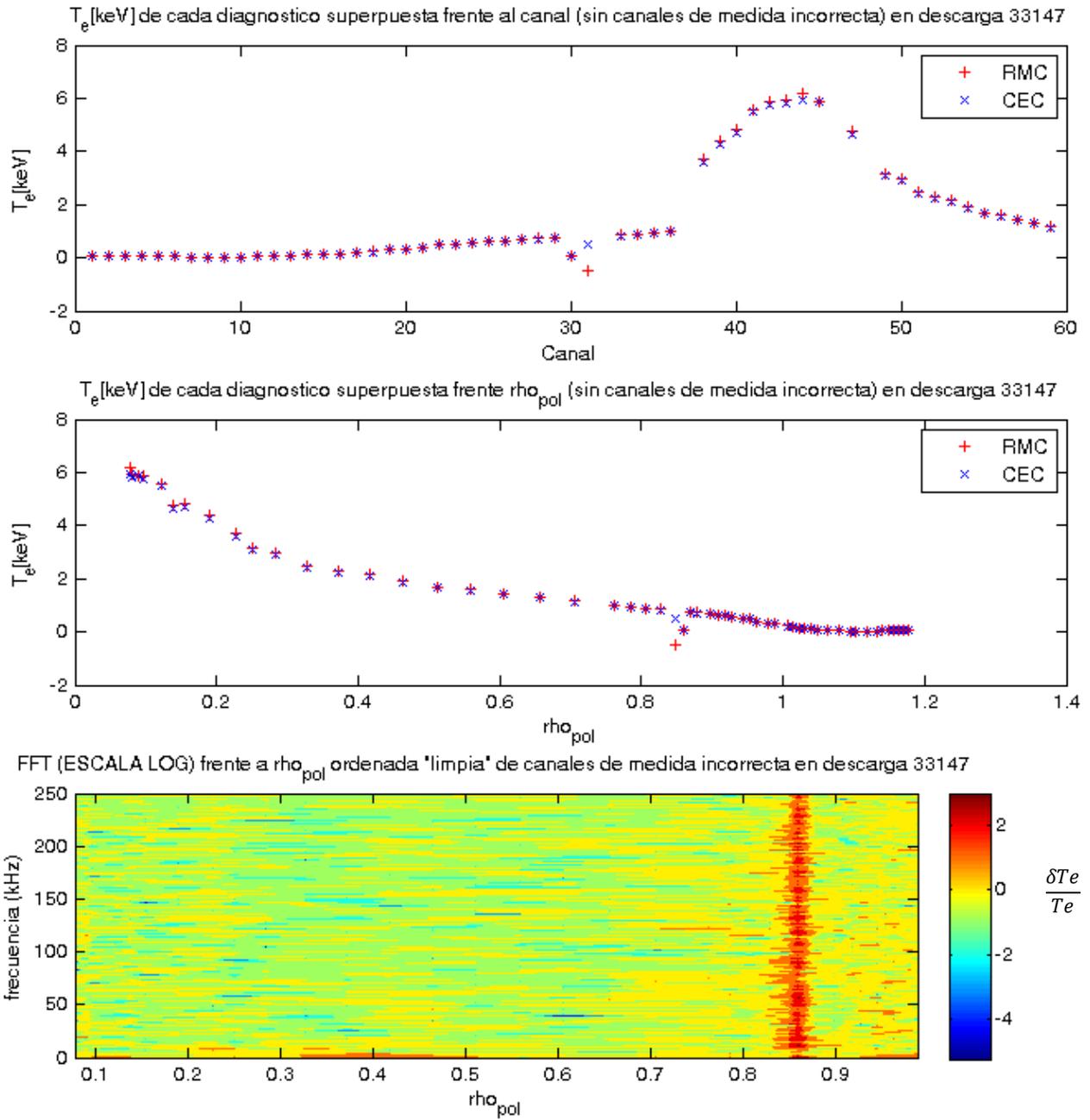


Figura 5.2.3.13. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.

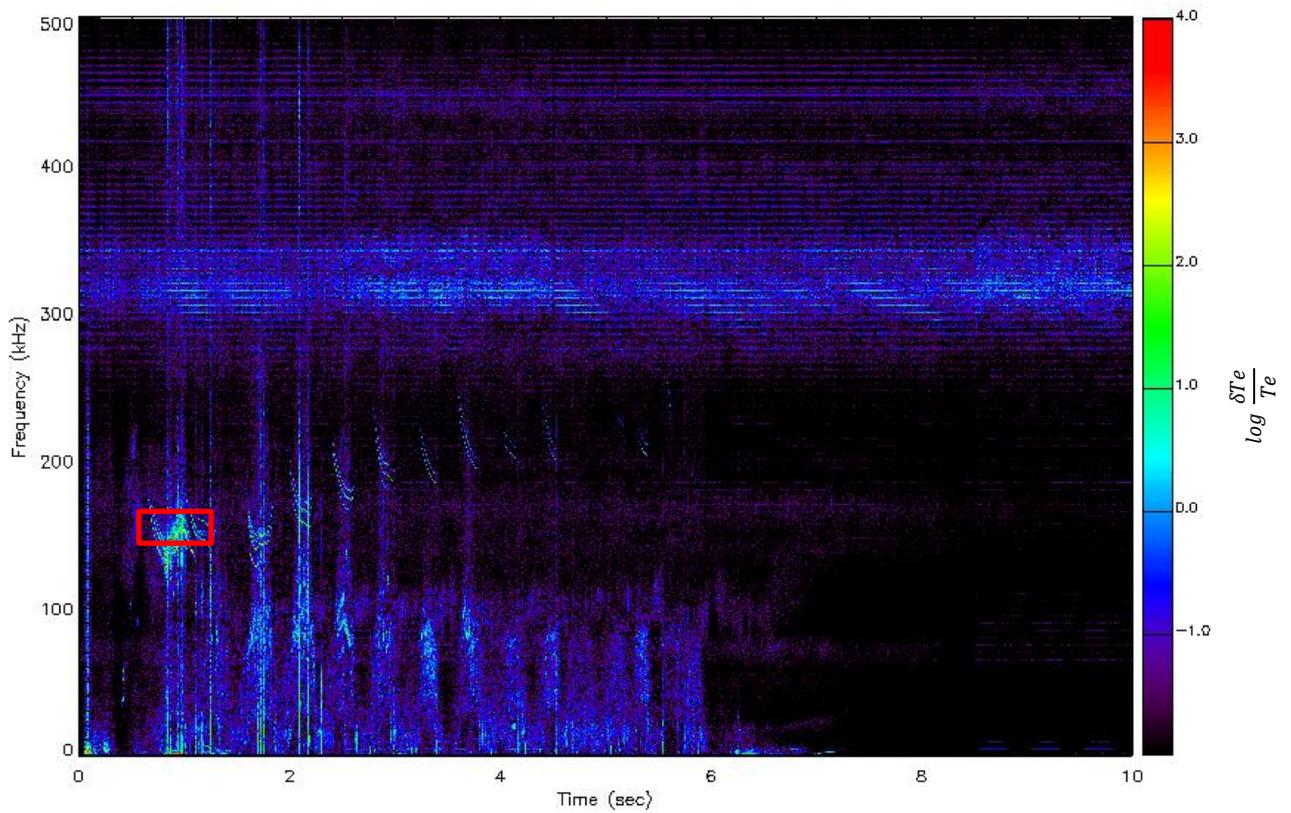
“Shot” 33145:

Figura 5.2.3.14. Utilización de Specview para la toma del intervalo de estudio, donde se representa la evolución de la temperatura para distintas frecuencias en el tiempo

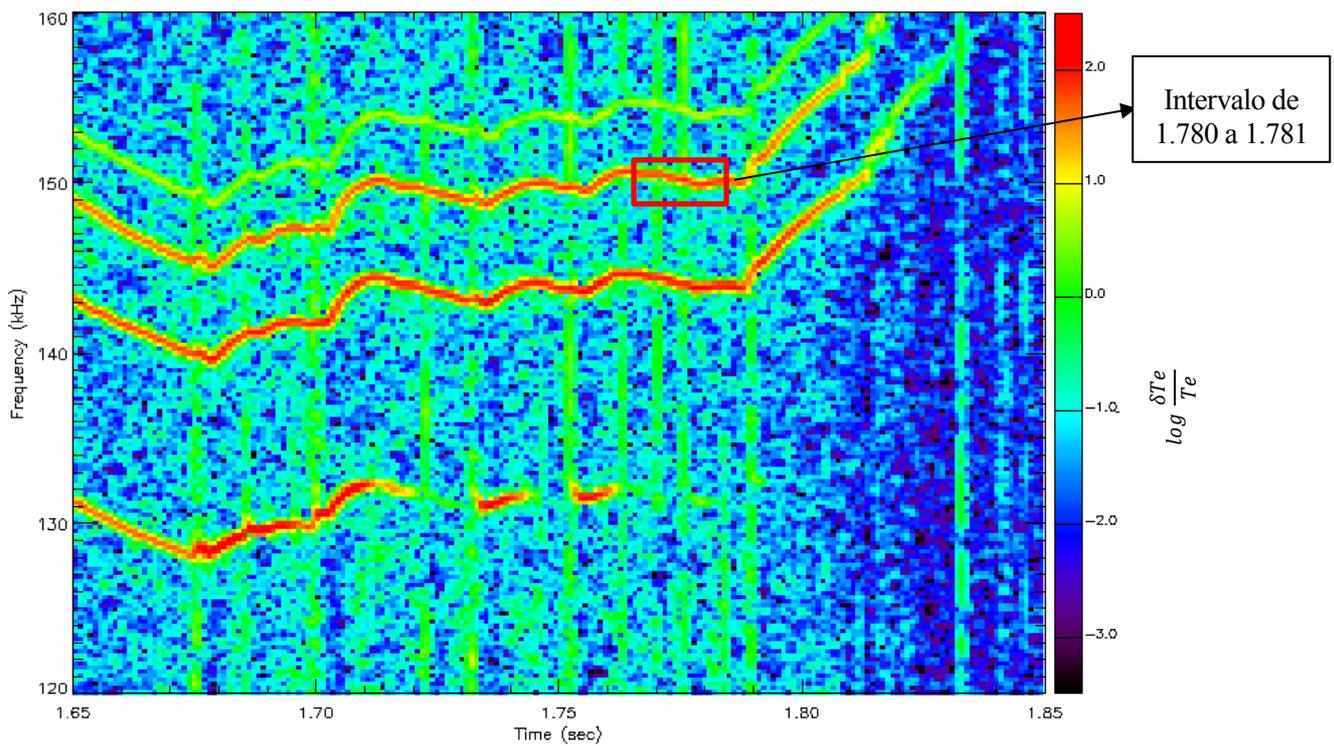


Figura 5.2.3.15. Intervalo a usar mostrado con mayor detalle

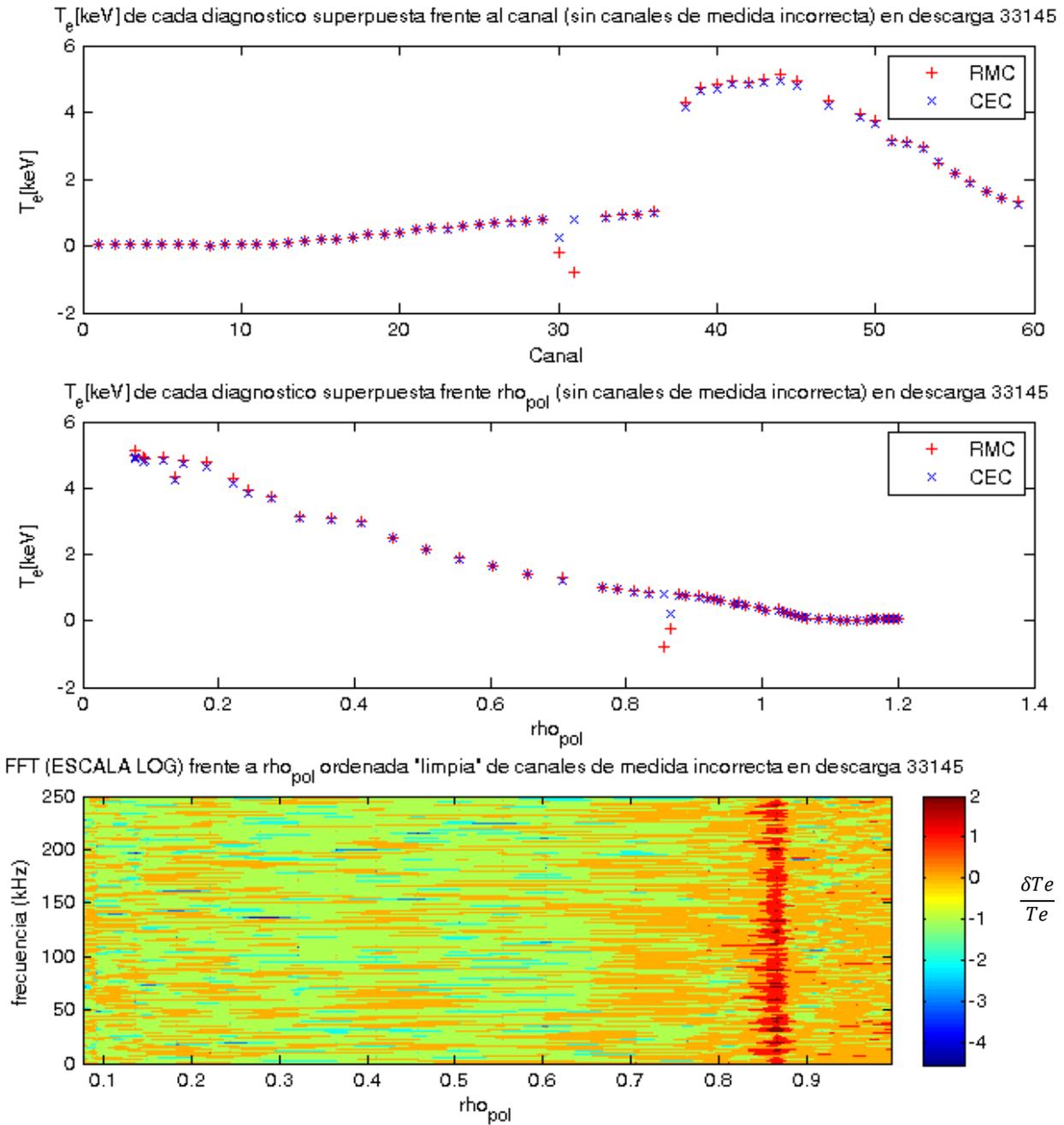


Figura 5.2.3.16. Representación en una misma figura de perfiles de temperatura (RMC y CEC) respecto a canales y “rho poloidal” junto a la FFT de temperatura en la escala logarítmica.

Como se viene observando en el estudio de otras descargas, tanto el diagnóstico CEC como el RMC ofrecen una toma de datos bastante similar, a excepción de algunos puntos, variables todos ellos según el “shot”. En ambos casos, la tendencia de la temperatura electrónica es la de disminuir progresivamente a medida que se aumenta la rho poloidal. Esto es un indicativo de una buena toma de datos, ya que la temperatura en el centro del reactor siempre será mayor que en la separatrix durante la descarga. El fácil manejo de estos diagnósticos hace posible un buen estudio inicial de los datos de temperatura del reactor, con las limitaciones que presentan cada uno, teniendo el RMC una mayor toma de datos en un mismo intervalo de tiempo que el CEC, pero con la necesidad de una calibración apoyada en el diagnóstico RMD, como se explicó durante este capítulo.

A la hora de visualizar los modos en las imágenes representadas, hay que tener en cuenta una serie de factores. Los modos de vibración serán aquellos en los que la variación de temperatura sea mayor (lo que se representa en colores más rojizos). Cada uno de estos puntos habría que estudiarlos para determinar si verdaderamente son modos, aunque son claros candidatos a ello. Cabe destacar que la columna vertical de valores altos de temperatura que se da entre las rho poloidales 0,8 y 0,9 no se corresponde con modos de vibración, si no con el “shine through” que se produce en las zonas próximas a la separatrix. Este se debe a que parte de la energía utilizada para calentar el plasma se pierde, acumulándose en esta zona. Una vez detectado un modo, se comprobaría si éste se corresponde con las características de los modos tipo RSAE, los cuales son menos intensos pero se dan en una zona más alargada, o del tipo TAE, que se dan en zonas concretas.

5.3. Conclusiones y trabajo futuro

La obtención de una herramienta de análisis para estudiar los datos ofrecidos por los diagnósticos supone una gran ayuda para el entendimiento del plasma en los reactores, siendo de gran utilidad para futuros desarrollos en esta tecnología. Mediante las imágenes resultantes expuestas anteriormente, se puede observar la ubicación aproximada de los modos de vibración en ese instante, ya sean TAEs o RSAEs.

Aunque el diagnóstico ECE sea fácil de analizar, brindando a su vez buenos resultados, tiene ciertas limitaciones de diseño, como en casos con baja densidad de plasma o con una serie de “ruidos”. Para ello se ha pensado realizar, en un futuro, una comparativa entre el análisis mediante Multipow del diagnóstico ECE y otros tipos de diagnósticos, como pueden ser el Lithium-beam emission spectroscopy o MTR (bobinas de Mirnov). La comparación entre los datos y análisis de los distintos diagnósticos producirá una optimización en los mismos.

Seguir avanzando en el conocimiento del plasma supone un acercamiento a la fusión como medio de obtención de energía para su consumo. Una energía limpia e inagotable, que supondrá un antes y un después en la forma de vida del ser humano, pudiendo acabar con problemas tan preocupantes como la contaminación medioambiental.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.es.lowtechmagazine.com/2011/10/energias-renovables-combustibles-fosiles.html>
- [2] http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_riemann.pdf
Riemann, Jörg (2016). *Summer fusion university: Physics of nuclear fusion*. Presentación del curso de verano de fusión nuclear del Intituto Max-Planck de física de plasma, en Greifwald (Alemania). Presentación sobre el estado y conocimientos actuales de la fusión nuclear.
- [3] http://www.diffen.com/difference/Nuclear_Fission_vs_Nuclear_Fusion
- [4] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Astro/astfus.html#c2>
- [5] <http://www.ipp.mpg.de/14869/tokamak>
- [6] <https://www.euro-fusion.org/jet/>
- [7] <http://www.ipp.mpg.de/16195/asdex>
- [8] <http://www.iter.org/mach>
- [9] <https://www.euro-fusion.org/programme/>
- [10] <http://www.ipp.mpg.de/14779/stellarator>
- [11] <http://www.ipp.mpg.de/w7x>
- [12] <http://www.fusion.ciemat.es/tj-ii/construccion-de-tj-ii/>
- [13] http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf Dinklage, A. (2016). *Summer fusion university: Basic plasma physics*. Presentación del curso de verano de fusión nuclear del Intituto Max-Planck de física de plasma, en Greifwald (Alemania). Resentación sobre el comportamiento físico del plasma y de su tratamiento en los reactores.
- [14] http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_puetterich.pdf Pütterich, T. (2016). *Summer fusion university: Experimental Results from Tokamak*. Presentación del curso de verano de fusión nuclear del Intituto Max-Planck de física de plasma, en Greifwald (Alemania). Presentación sobre resultados en experimentos en los reactores tipo Tokamak.

[15] http://www-fusion.ciemat.es/New_fusion/en/Fusion/glosario_es.pdf

[16] <https://www.aug.ipp.mpg.de/aug/local/diagnostik4/index.html>

Referencias de imágenes

- (1) Figura 1.1. Industria expulsando CO₂ y otros compuestos a la atmósfera
<https://pixabay.com/es/azul-co2-di%C3%B3xido-energ%C3%ADa-gases-88068/>
- (2) Figura 1.2. Deshielo de los polos y especies que lo sufren
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polar_bear_\(Ursus\)_maritimus_female_with_its_cub,_Svalbard_\(2\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polar_bear_(Ursus)_maritimus_female_with_its_cub,_Svalbard_(2).jpg)
- (3) Figura 1.3. Evolución del consumo de energía mundial a lo largo de los años
<http://www.es.lowtechmagazine.com/2011/10/energias-renovables-combustibles-fosiles.html>
- (4) Figura 1.4. Desechos radioactivos de una central nuclear
<http://blog.is-arquitectura.es/2016/02/20/nuevo-cemento-para-almacenar-residuos-radioactivos/>
- (5) Figura 2.1. Energía de enlace por nucleón con respecto al número de nucleones totales
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_riemann.pdf
- (6) Figura 2.2. Relación entre la masa y la energía, ecuación de Einstein
<https://id.linkedin.com/in/ruly-octora-suseno-7b8763aa>
- (7) Figura 2.3. Barrera de Coulomb
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_riemann.pdf
- (8) Figura 2.4. Animación caricaturesca sobre el efecto túnel
http://teoriaderuedas.com/evolucion_de_la_materia/tercera_fase-interacciones/efecto_tunel-efecto_josephson/
- (9) Figura 2.1.1. Almacén subterráneo de residuos nucleares
<http://serjev.blogspot.com.es/>
- (10) Figura 2.2.1. El Sol
<https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%A9%D7%9E%D7%A9>
- (11) Figura 2.2.2. Cadena protón-protón
<http://eltamiz.com/2007/09/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-las-entranas-de-una-estrella/>
- (12) Figura 2.2.3. Ciclo del carbono
https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_CNO
- (13) Figura 2.2.4. Probabilidad de ocurrencia de distintas reacciones de fusión para distintos niveles de energía
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_riemann.pdf

- (14) Figura 2.2.5 Representación artística de la producción de tritio en el reactor
<http://environmentalresearchweb.org/cws/article/opinion/43980>
- (15) Figura 2.2.6. Sección eficaz de distintas reacciones de fusión para distintos niveles de energía
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_riemann.pdf
- (16) Figura 2.2.7. Proceso de confinamiento inercial
https://es.wikipedia.org/wiki/Confinamiento_inercial
- (17) Figura 2.2.8. Representación del confinamiento magnético
<http://controlmindbarcelona.blogspot.com.es/2015/02/botella-klein-y-confinamiento-magnetico.html>
- (18) Figura 3.1. Trayectorias de iones y electrones al aplicar campo magnético
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_suttrop.pdf
- (19) Figura 3.1.1. Representación artística de un reactor tipo Tokamak
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_suttrop.pdf
- (20) Figura 3.1.2. Enrollamiento del campo magnético
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_puetterich.pdf
- (21) Figura 3.1.1.1. Siete de las 16 bobinas magnéticas principales del ASDEX durante su montaje
<http://www.ipp.mpg.de/14905/magnetspulen>
- (22) Figura 3.1.2.1. Trabajadores realizando labores de mantenimiento en el interior de la vasija de un reactor tipo Tokamak (ASDEX)
<http://www.ipp.mpg.de/14929/plasmagefaess>
- (23) Figura 3.1.3.1. En rojo: Placas de los colectores del divertor
<http://www.investigacionciencia.es/noticias/europa-pospone-la-financiacion-de-un-reactor-de-investigacion-de-fusion-que-vale-500-millones-de-euros-15458>
- (24) Figura 3.1.4.1. Gránulo de deuterio congelado evaporándose (cuadro rojo) (ASDEX)
<http://www.ipp.mpg.de/14881/brennstoff>
- (25) Figura 3.1.5.1. Descarga de plasma (ASDEX)
<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/exptypen/tokamak/plasmaentladungen/index>
- (26) Figura 3.2.1.1 Representación artística del reactor experimental JET
<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/cea/jet/jet.htm>
- (27) Figura 3.2.2.1. Interior del ASDEX
<http://www.ipp.mpg.de/16195/asdex>
- (28) Figura 3.2.2.2. Sección transversal de ASDEX
<http://www.ipp.mpg.de/16208/einfuehrung>
- (29) Figura 3.2.2.3. Equipo de trabajadores del ASDEX, compuesto por más de 200 científicos
<http://www.ipp.mpg.de/16340/stand>
- (30) Figura 3.2.3.1. Representación artística del futuro reactor de fusión ITER en funcionamiento
<https://lenergeek.com/2017/02/16/fusion-nucleaire-vraiment-projet-iter/>

- (31) Figura 3.2.3.2. Construcción del reactor ITER
<http://francis.naukas.com/2015/11/24/nuevo-retraso-en-el-proyecto-iter/>
- (32) Figura 3.2.4.1 Evolución prevista de los reactores tipo Tokamak
<https://www.nextbigfuture.com/2016/05/compact-spherical-tokamak-would-be-100.html>
- (33) Figura 3.3.1 Representación reactor tipo Stellarator
<https://www.sophimania.pe/ciencia/fisica-mundo-cuantico-y-futuro/el-extrano-reactor-de-fusion-nuclear-fue-probado-con-exito-en-alemania/>
- (34) Figura 3.3.1.1. Bobina magnética del Stellarator Wendenstein 7-X durante su montaje
<http://www.ipp.mpg.de/14824/magnetspulen>
- (35) Figura 3.3.2.1. Interior de un reactor tipo Stellarator
http://www.ipp.mpg.de/3984226/12_15
- (36) Figura 3.3.3.1. Distribución de las placas del divertor en un reactor tipo Stellarator
<http://www.ipp.mpg.de/14839/plasmabegrenzung>
- (37) Figura 3.3.5.1. Descarga en el reactor Stellarator Wendelstein 7-X
<http://www.ipp.mpg.de/14809/entladungen>
- (38) Figura 3.4.1.1. Representación del plasma en el reactor Wendelstein 7-X
https://en.wikipedia.org/wiki/Wendelstein_7-X
- (39) Figura 3.4.1.2. Primer plasma en Wendelstein
<http://www.ipp.mpg.de/3982357/stand>
- (40) Figura 3.4.2.1. Reactor TJ-II visto desde arriba
http://www.fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/iter_y_la_energia_de_fusion
- (41) Figura 4.1. Evolución de los estados de la materia conforme se le va aumentando su energía
<http://www.adhesiveandglue.com/plasma-adhesive.html>
- (42) Figura 4.1.1. Auroras boreales, un tipo de plasma en nuestro planeta
<https://locuraviajes.com/10-mejores-sitios-para-ver-la-aurora-boreal/>
- (43) Figura 4.1.2. Tipos de plasma según su densidad electrónica y su temperatura
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (44) Figura 4.3.1. Movimiento de las partículas tipo “trapped” en el reactor
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (45) Figura 4.3.2. Corte transversal de un reactor Tokamak en el que se muestran las líneas de coordenada magnética ρ , siendo el eje y la altura Z en metros y la distancia radial R en metros, con algunos canales de medida en forma de círculos negros
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_suttrop.pdf
- (46) Figura 4.5.1. Receptor de datos de ECE
<https://www.aug.ipp.mpg.de/aug/local/diagnostik4/index.html>

Referencias de ecuaciones

- (1) Ecuación 3-1. Criterio de Lawson
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_riemann.pdf
- (2) Ecuación 4-1. Campo eléctrico producido por la separación de cargas
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (3) Ecuación 4-2. Cálculo de la frecuencia del plasma
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (4) Ecuación 4-3. Cálculo de la longitud de Debye en un plasma
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (5) Ecuación 4-4. Ratio de reacciones de fusión en el plasma
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (6) Ecuación 4-5. Cálculo del radio del helicoide formado en las trayectorias de los iones y electrones sometidas al campo magnético
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (7) Ecuación 4-6. Cálculo de la frecuencia de ciclotrón
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (8) Ecuación 4-7. Cálculo del factor de seguridad del plasma
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_19_Mon/ipp_su16_dinklage.pdf
- (9) Ecuación 4-8. Frecuencia de los modos de vibración toroidales (TAE)
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_puetterich.pdf
- (10) Ecuación 4-9. Frecuencia de los modos de vibración de tipo RSAE
http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/Vortraege/2016_09_21_Wed/ipp_su16_puetterich.pdf

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

A continuación se presentan fuentes de información utilizadas continuamente en la redacción de la memoria.

Libro: Roberto Bilato, Ralf Kleiber (2016): *IPP Summer University for Plasma Physics*. En él se derrollan todos los conceptos de las diapositivas del curso de verano de IPP de forma escrita, ampliando en todos ellos.

http://home.mpcdf.mpg.de/~apu/su2016/ipp_su2016_script.pdf

Libro: Julio Martinell Benito (1995): *Esfuerzo para controlar la fusión nuclear*. En él se tocan conceptos generales sobre la fusión, tanto su tecnología en el desarrollo del plasma como los conceptos básicos de la reacción.

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/prometeo.htm>