

# Universitat Politècnica de Catalunya – Universitat de Barcelona

## Máster oficial de Ingeniería de la Energía

### *Ficha de descripción de asignatura*

<b>Asignatura</b>		<b>FUSION NUCLEAR</b>		<b>Código:</b>	<b>33547</b>
				<b>Versión:</b>	
<b>Tipo:</b>	Especialidad	<b>Créditos totales ECTS:</b>	5	<b>Horas/semana totales:</b>	
		<b>Créditos presenciales Teoría:</b>	2,5	<b>Horas/semana presenciales Teoría:</b>	
<b>Horas/crédito:</b>	25	<b>Créditos presenciales Problemas:</b>	1	<b>Horas/semana presenciales Problemas:</b>	
<b>Cuatrimestre:</b>		<b>Créditos presenciales Laboratorio:</b>	1.5	<b>Horas/semana presenciales Laboratorio:</b>	
<b>Nivel:</b>		<b>Créditos no presenciales:</b>		<b>Horas/semana no presenciales:</b>	
<b>Coordinador:</b>	Javier Dies, FEEL-DFEN-UPC				
<b>Profesores:</b>	Guillem Cortes, FEEL-DFEN-UPC				
<b>Profesores invitados:</b>	Enrico Di Pietro EDFA-CSU-Barcelona Alfredo Portone EFDA-CSU-Barcelona Joaquin Sanchez Asociacion Euratom-Ciemat para la Fusion Jeronimo Garcia CEA-DRFC-Cadarache				
<b>Horario lugar de tutorías:</b>	i UPC-ETSEIB-SEN, Cuatrimestre de otoño. QI de				
<b>Prerrequisitos:</b>					
<b>Co-requisitos:</b>					
<b>Objetivos generales:</b>	Presentar los principios físicos y tecnológicos en que se basa el desarrollo de la energía nuclear de fusión.				
<b>Objetivos específicos de cada tema:</b>	Proporcionar una panorámica general de los diferentes caminos que actualmente se contemplan para la consecución del reactor comercial de fusión. Introducir los aspectos tecnológicos que requiere la energía de fusión Conocer los fundamentos básicos de cálculo y evaluación. Presentar el proyecto ITER, sus aspectos tecnológicos, programa de construcción				
<b>Objetivos transversales:</b>					
<b>Programa de Teoría:</b>	<b>0. Presentación de la asignatura (1h).</b> <b>1. Introducción (3h).</b> 1.1. Recursos Energéticos. 1.2. Reacciones de fusión. 1.3. Combustibles de los reactores de fusión. 1.4. Productos de fusión. 1.5. Historia de la fusión termonuclear. <b>2. Tasa de reacciones de fusión (5h)</b> 2.1. Funciones distribución en un plasma. 2.2. Evolución de un plasma termonuclear. 2.3. Secciones eficaces. 2.4. Dos distribuciones maxwellianas. 2.5. Un haz monoenergético y un plasma maxwelliano. 2.6. Tasa de reacciones. 2.7. Tasa de reacciones en un plasma de una sola especie. 2.8. Densidad de potencia. Fluencia. <b>3. Perdidas de energía en un plasma termonuclear (3h).</b> 3.1. Perdidas por radiación de frenada, Bremsstrahlung. 3.2. Perdidas por radiación ciclotrón. 3.3. Ionización y recombinación. 3.4. Intercambio de carga. <b>4. Balance de energía en un plasma termonuclear (3h).</b> 4.1. Criterio de Lawson.				

- 4.2. Ecuaciones de conservación.
- 4.3. Equilibrio y temperatura de ignición.
- 5. Sistemas de confinamiento de plasmas (5h).**
- 5.1 Introducción. Clasificación.
- 5.2. Sistemas abiertos. Espejos magnéticos: principio de confinamiento; espejo simple, espejo de mínimo B; espejo baseball, espejo Ying-yang.
- 5.3. Sistemas cerrados. Introducción, inestabilidades, familias de sistemas cerrados. Campos magnéticos: toroidal, poloidal.
- 5.4. Tokamaks. JET. Tore-Supra, DIII-D. ITER.
- 5.5. Stellarators. TJ-II, LHD, Wendelstein 7-AS, Wendelstein 7-X.
- 6. Sistemas de calentamiento de plasmas (2h).**
- 6.1. Calentamiento óhmico.
- 6.2. Inyección neutros.
- 6.3. Compresión adiabática.
- 6.4. Calentamiento por radiofrecuencia.
- 6.5. Calentamiento por electrones relativistas.
- 7. Pureza del plasma. Alimentación de combustible (2h).**
- 7.1. Impurezas: efectos, concentraciones.
- 7.2. Acumulación de helio.
- 7.3. Divertores.
- 7.4. Alimentación de combustible: gas-puffing, inyección de neutros.
- 8. Sistemas de extracción de energía (2h).**
- 8.1. Termohidráulica en reactores de fusión.
- 8.2. Diseño de módulos de pared.
- 8.3. Conversión directa de energía.
- 9. Sistemas de Diagnostico (2h).**
- 9.1. Medidas de densidades.
- 9.2. Medidas de temperaturas.
- 9.3. Medidas de productos de fusión.
- 10. Neutrónica. Producción de tritio (2h).**
- 10.1. Distribución del flujo neutrónico.
- 10.2. Tasa de producción tritio.
- 10.3. Efectos de los neutrones sobre materiales del reactor.
- 10.4. Diseño de blindajes.
- 11. Fusión por confinamiento inercial (2h).**
- 11.1. Introducción.
- 11.2. Criterio de Lawson en los SCI.
- 11.3. Etapas del confinamiento inercial.
- 11.4. Fusión por láser: el láser. Transferencia de energía al plasma.
- 11.5. Fusión por haces de partículas: por electrones relativistas, por iones.
- 12. El proyecto ITER (4h)**
- 12.1. Características principales.
- 12.2. Diseño.
- 12.3. Programa de construcción.
- 12.4. Programa de operación.
- 12.5. Estudios de seguridad e impacto ambiental.

**Conferencias invitadas:**

- CONFERENCIA INVITADA 1  
ENRICO DI PIETRO  
DIRECTOR EFDA-CSU BARCELONA  
TECNOLOGIA DEL REACTOR ITER
- CONFERENCIA INVITADA 2  
ALFREDO PORTONE  
EFDA-CSU BARCELONA  
PLASMA CONTROL OF FUSION REACTORS
- CONFERENCIA INVITADA 3  
JOAQUIN SANCHEZ  
DIRECTOR LABORATORIO NACIONAL DE FUSION  
PRESENTACIÓN DEL REACTOR DE FUSION TJ-II

**Prácticas de Laboratorio:** Para favorecer el aprovechamiento de la asignatura se ha preparado un conjunto de prácticas.

**• Utilización de un simulador de un reactor de fusión nuclear tipo tokamak para fines docentes.**

Estas prácticas se realizarán en las aulas informáticas de la ETSEIB. El desarrollo de las prácticas se hará individualmente.

P1. Reproducción de experiencias reales de dispositivos de fusión (Jet y Tore Supra).

P2. Simulación de la operación del reactor de fusión ITER.

P3. Mejora del confinamiento de un plasma termonuclear: Inversión del perfil del factor de seguridad.  
(10 horas)

*Metodología para el desarrollo de las prácticas:*

-Presentación de las aplicaciones por parte del profesor: alcance, modelos y bases de datos.

-Ejecución de los programas: definición de parámetros, entrada de datos, almacenaje de datos.

-Análisis de resultados.

-Resolución de las cuestiones planteadas y elaboración de la memoria.

**• Participación remota en un experimento de fusión termonuclear. Seguimiento remoto de una descarga del experimento TJ-II flexible heliac, del Laboratorio Nacional de Fusión, en el CIEMAT, Madrid.**

Se puede ver en tiempo real unas 300 variables del experimento TJ-II, con sonido e imagen de la sala de control del dispositivo. Se realiza el control remoto del diagnóstico CX, que permite medir la temperatura de los iones. Se ha realizado medidas de hasta 20 millones de grados.

**VISITA TÉCNICA:**

En cada curso se realizará **una** visita técnica al reactor francés Tore Supra y al emplazamiento ITER :

Tore Supra es un reactor de fusión termonuclear tipo tokamak, construido en 1989. Para crear el campo magnético toroidal, utiliza bobinas superconductoras. Departament de Recherches sur la Fusion Contrólée, Commissariat d'Energie Atomique, Associació EURATOM-CEA sur la fusion, Cadarache França.

<http://www-cad.cea.fr>

-Se visitará el emplazamiento donde se han iniciado los trabajos para la construcción del ITER. Este es un reactor de fusión de 500 MW de potencia nominal, tipo tokamak. Utiliza bobinas superconductoras. El presupuesto es de unos 4500 M€ Se trata del segundo proyecto de investigación de carácter internacional más grande del mundo. Participan: Estados Unidos, Japón, Europa, China, Rusia, Corea del Sur, India.

<http://www.iter.org>

(Tiempo, 7 horas + viajes)

Durante las visitas se da especial importancia a los aspectos tecnológicos relativos a: sistemas de calentamiento por inyección de neutros, por radiofrecuencia, sistemas criogénicos, sistemas eléctricos para generación de campos magnéticos, sistemas de diagnóstico de plasmas, seguridad

**Actividades No Presenciales:**

La Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado el entorno ATENEA sobre el cual la ETSEIB ha implementado su CAMPUS DIGITAL.

Para incrementar la comunicación entre el estudiante y el profesor, en el desarrollo de esta asignatura se utilizará el Campus Digital como medio adicional de comunicación asíncrona.

Los usos habituales del Campus Digital de la ETSEIB en la asignatura Fusión Nuclear son:

- Poner calificaciones de los estudiantes en los distintos actos de evaluación.
- Anuncio de conferencias, videoconferencias y seminarios.
- Anuncio de cambios de fechas u horas, en la programación de la asignatura: prácticas, visitas técnicas, evaluaciones.
- Concertar entrevistas entre profesor y estudiante.
- Visualizar el historial del estudiante.
- Distribuir documentación.
- Anuncios generales (ofertas de trabajos, ofertas de becas, noticias relativas a la ingeniería nuclear,..)

**Carga semanal del estudiante en horas:**

Tipo de actividad / Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
Teoría																
Prácticas																
Problemas																
Actividad No presencial																
Trabajo individual																
Trabajo en grupo																
Pruebas y exámenes																
Otras actividades																
<b>TOTAL</b>																

**Metodología docente:**

**CLASES TEÓRICAS Y DE EJERCICIOS.**

En las exposiciones en el aula se desarrolla el contenido de las diferentes lecciones que constituyen el programa, incluyendo la realización de ejercicios que permitan fijar y cuantificar los conceptos presentados.

Para mejorar el aprovechamiento de estas sesiones, el profesorado usará transparencias que permitan enriquecer gráficamente las ideas principales de la exposición. Con antelación suficiente se distribuirán a los estudiantes ejemplares en papel de las transparencias, facilitando la concentración en las explicaciones y evitando la necesidad de tomar excesivas notas. Se distribuirá material multimedia relativo a la asignatura.

#### **PROYECCIÓN DE DOCUMENTALES.**

Para ilustrar los aspectos tecnológicos de algunos temas, el desarrollo de los mismos se complementa con la proyección de diversos documentales.

- Fusión por confinamiento magnético.
- Materiales superconductores utilizados en el reactor Tore Supra.
- JET, Joint European Torus.

#### **PRÁCTICAS.**

Para favorecer el aprovechamiento de la asignatura se ha preparado el conjunto de prácticas descrito anteriormente.

#### **Bibliografía Básica:**

1. Raeder, J. (1986): *Controlled nuclear Fusion, fundamentals of its utilization for energy supply*, Wiley & Sons, New York, 316 págs.
2. Wesson, J. (2004): "Tokamaks", Oxford Science publications, Clarendon press- Oxford, 680 pag.
3. Dolan, J.J. (1982): *Fusion research*. Pergamon Press, (tres volúmenes).
4. Dies, J.; Albajar, F.; Fontanet, J. (1998); "Utilització d'un simulador d'un reactor de fusió nuclear tipus tokamak per a fins docents", 94 pag., Barcelona.
5. Dies, J.; (2007); "Transparencias Fusión Nuclear, ITER" Edicions CPDA, 304 pag., Barcelona.
6. DG XII Fusion Programme "dominar la energia de las estrellas", CD-Rom, 2003.

#### **Bibliografía Complementaria:**

1. Hutchinson, I.H., (2000): "Principles of plasma diagnostics", Cambridge University press, 364 pag.
2. Masahiro Wakatami (1998) ; "Stellarators and heliotron devices", Oxford University Press.
3. CEA (1987), *La fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique*. Masson.
4. Kammash, T. (1975): *Fusion Reactor Physics*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan.
5. JET, Joint Undertaking (1995), *JET Progress Report*, EUR EN, EUR-JET-PR8.
6. Jeffrey Freidberg (2007); "Plasma Physics and Fusion Energy", Cambridge University press, 671 pag.

#### **Criterio de evaluación:**

La evaluación se realiza asignando un peso a las diferentes actividades desarrolladas en el marco de la asignatura, tal como se indica en la expresión siguiente. Se considera la asistencia a las clases y conferencias invitadas (A), las memorias presentadas por los estudiantes correspondientes a cada trabajo práctico (MP), la asistencia a las prácticas (AP), la participación en la visita técnica (V). La calificación final (NF) se obtendrá con la siguiente expresión:

$$NF = 0.40 * A + 0.25 * MP + 0,15 * AP + 0.15 * V$$

#### **EUROPEAN MASTER OF SCIENCE IN NUCLEAR ENGINEERING (EMSNE):**

Los cinco créditos ECTS correspondientes a esta asignatura contabilizan como formación nuclear para la obtención del European Master of Science in Nuclear Engineering (EMSNE) impulsado por la European Nuclear Education Network (ENEN).

<http://www-sen.upc.es>