

# Universitat Politècnica de Catalunya – Universitat de Barcelona

## Màster oficial d'Enginyeria en Energia

### *Fitxa de descripció d'assignatura*

<b>Assignatura</b>		<b>FUSIÓ NUCLEAR</b>		<b>Codi: 33547</b>	
				<b>Versió:</b>	
<b>Tipus:</b>	Especialitat	<b>Crèdits totals ECTS:</b>	5	<b>Hores/setmana totals:</b>	8,33
<b>Idioma:</b>		<b>Crèdits presencials Teoria:</b>	2,5	<b>Hores/setmana presencials Teoria:</b>	1,87
<b>Hores/crèdit:</b>	25	<b>Crèdits presencials Problemes:</b>	1	<b>Hores/setmana presencials Problemes:</b>	0
<b>Quadrimestre:</b>		<b>Crèdits presencials Laboratori:</b>	1,5	<b>Hores/setmana presencials Laboratori:</b>	0
<b>Nivell:</b>		<b>Crèdits no presencials:</b>	3	<b>Hores/setmana no presencials:</b>	6,47
<b>Coordinador:</b>	Javier Dies, FEEL-DFEN-UPC				
<b>Professors:</b>	Guillem Cortes, FEEL-DFEN-UPC				
<b>Professors convidats:</b>	Enrico Di Pietro EDFE-CSU-Barcelona Alfredo Portone EFDA-CSU-Barcelona Joaquin Sanchez Asociacion Euratom-Ciemat para la Fusion Jeronimo Garcia CEA-DRFC-Cadarache				
<b>Horari i lloc de tutories:</b>	UPC-ETSEIB-SEN, Cuatrimestre de otoño. QI				
<b>Pre-requisits:</b>					
<b>Co-requisits:</b>					
<b>Objectius generals:</b>	Presentar els principis físics i tecnològics en què es basa el desenvolupament de l'energia nuclear de fusió.				
<b>Objectius específics de cada tema:</b>	Proporcionar una panoràmica general dels diferents camins que actualment es contemplan per a la consecució del reactor comercial de fusió.  Introduir els aspectes tecnològics que requereix l'energia de fusió  Conèixer els fonaments bàsics de càlcul i avaluació.  Presentar el projecte ITER, els aspectes tecnològics, programa de construcció				
<b>Objectius transversals:</b>					
<b>Programa de Teoria:</b>	<b>0. Presentació de l'assignatura (1h).</b> <b>1. Introducció (3 h).</b> 1.1. Recursos Energètics. 1.2. Reaccions de fusió. 1.3. Combustibles dels reactors de fusió. 1.4. Productes de fusió. 1.5. Història de la fusió termonuclear. <b>2. Taxa de reaccions de fusió (5h)</b> 2.1. Funcions distribució en un plasma. 2.2. Evolució d'un plasma termonuclear. 2.3. Seccions eficaces. 2.4. Dues distribucions maxwelianas. 2.5. Un feix monoenergètic i un plasma maxweliano. 2.6. Taxa de reaccions. 2.7. Taxa de reaccions en un plasma d'una sola espècie. 2.8. Densitat de potència. Fluència. <b>3. Pèrdues d'energia en un plasma termonuclear (3h).</b> 3.1. Pèrdues per radiació de frenada, Bremsstrahlung.				

3.2. Pèrdues per radiació ciclotró.

3.3. Ionització i recombinació.

3.4. Intercanvi de càrrega.

#### **4. Balanç d'energia en un plasma termonuclear (3h).**

4.1. Criteri de Lawson.

4.2. Equacions de conservació.

4.3. Equilibri i temperatura d'ignició.

#### **5. Sistemes de confinament de plasmes (5h).**

5.1. Introducció. Classificació.

5.2. Sistemes oberts. Miralls magnètics: principi de confinament; mirall simple, mirall de mínim B; mirall baseball, mirall Ying-yang.

5.3. Sistemes tancats. Introducció, inestabilitats, famílies de sistemes tancats. Camps magnètics: toroidal, poloidal.

5.4. Tokamaks. JET. Tore-Supra, DIII-D. ITER.

5.5. Stellarators. TJ-II, LHD, Wendelstein 7-AS, Wendelstein 7-X.

#### **6. Sistemes d'escalfament de plasmes (2h).**

6.1. Escalfament òhmic.

6.2. Injecció neutres.

6.3. Compressió adiabàtica.

6.4. Escalfament per radiofreqüència.

6.5. Escalfament per electrons relativistes.

#### **7. Puresa del plasma. Alimentació de combustible (2h).**

7.1. Impureses: efectes, concentracions.

7.2. Acumulació d'heli.

7.3. Divertores.

7.4. Alimentació de combustible: gas-Puffing, injecció de neutres.

#### **8. Sistemes d'extracció d'energia (2h).**

8.1. Termohidràulica en reactors de fusió.

8.2. Disseny de mòduls de paret.

8.3. Conversió directa d'energia.

#### **9. Sistemes de Diagnòstic (2h).**

9.1. Mesures de densitats.

9.2. Mesures de temperatures.

9.3. Mesures de productes de fusió.

#### **10. Neutrònica. Producció de triti (2h).**

10.1. Distribució del flux neutrònic.

10.2. Taxa de producció triti.

10.3. Efectes dels neutrons sobre materials del reactor.

10.4. Disseny de blindatges.

#### **11. Fusió per confinament inercial (2h).**

11.1. Introducció.

11.2. Criteri de Lawson en els SCI.

11.3. Etapes del confinament inercial.

11.4. Fusió per làser: el làser. Transferència d'energia al plasma.

11.5. Fusió per feixos de partícules: per electrons relativistes, per ions.

#### **12. El projecte ITER (4h)**

12.1. Característiques principals.

12.2. Disseny.

12.3. Programa de construcció.

12.4. Programa d'operació.

12.5. Estudis de seguretat i impacte ambiental.

**Conferències convidades:****• CONFERÈNCIA CONVIDADA 1**

ENRICO DI PIETRO  
DIRECTOR EFDA-CSU BARCELONA  
TECNOLOGIA DEL REACTOR ITER

**• CONFERÈNCIA CONVIDADA 2**

ALFREDO Portone  
EFDA-CSU BARCELONA  
PLASMA CONTROL OF FUSION REACTORS

**• CONFERÈNCIA CONVIDADA 3**

JOAQUIN SANCHEZ  
DIRECTOR LABORATORI NACIONAL DE FUSION  
PRESENTACIÓ DEL REACTOR DE FUSION TJ-II

**Pràctiques de Laboratori:** Per afavorir l'aprofitament de l'assignatura s'ha preparat un conjunt de pràctiques.

Pràctiques de Laboratori: Per afavorir l'aprofitament de l'assignatura s'ha preparat un conjunt de pràctiques.

**• Utilització d'un simulador d'un reactor de fusió nuclear tipus tokamak per a fins docents.**

Aquestes pràctiques es realitzaran a les aules informàtiques de l'ETSEIB. El desenvolupament de les pràctiques es farà individualment.

P1. Reproducció d'experiències reals de dispositius de fusió (Jet i Tore Supra).

P2. Simulació de l'operació del reactor de fusió ITER.

P3. Millora del confinament d'un plasma termonuclear: Inversió del perfil del factor de seguretat.

(10 hores)

Metodologia per al desenvolupament de les pràctiques:

Presentació de les aplicacions per part del professor: abast, models i bases de dades.

-Execució dels programes: definició de paràmetres, entrada de dades, emmagatzematge de dades.

Anàlisi de resultats.

-Resolució de les qüestions plantejades i elaboració de la memòria.

**• Participació remota en un experiment de fusió termonuclear. Seguiment remot d'una descàrrega del experiment TJ-II flexible heliac, del Laboratori Nacional de Fusió, en el CIEMAT, Madrid.**

Es pot veure en temps real unes 300 variables de l'experiment TJ-II, amb so i imatge de la sala de control de l' dispositiu. Es realitza el control remot del diagnòstic CX, que permet mesurar la temperatura dels ions. S'ha realitzat mesures de fins a 20 milions de graus.

**VISITA TÈCNICA:**

A cada curs es realitzarà una visita tècnica al reactor francès Tore Supra i l'emplaçament ITER:

Tore Supra és un reactor de fusió termonuclear tipus tokamak, construït el 1989. Per a crear el camp magnètic toroidal, utilitza bobines superconductores. Departament de Recherches sur la Fusion Contrôlée, Commissariat d'Energie Atomique, Associació EURATOM-CEA sud la fusió, Cadarache França.

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

-Es visitarà l'emplaçament on s'han iniciat els treballs per a la construcció de l'ITER. Aquest és un reactor de fusió de 500 MW de potència acaba nominal, tipus tokamak. Utilitza bobines superconductores. El pressupost és d'uns 4500 M € Es tracta del segon projecte de recerca de caràcter internacional més gran del món. Hi participen: Estats Units, Japó, Europa, Xina, Rússia, Corea del Sud, Índia.

<http://www.iter.org>

(Temps, 7 hores + viatges)

Durant les visites es dona especial importància als aspectes tecnològics relatius a: sistemes d'escalfament per injecció de neutres, per radiofreqüència, sistemes criogènics, sistemes elèctrics per a generació de camps magnètics, sistemes de diagnòstic de plasmes, seguretat

**Activitats No Presencials:**

La Universitat Politècnica de Catalunya ha desenvolupat l'entorn ATENEA sobre el qual l'ETSEIB ha implementat el seu CAMPUS DIGITAL.

Per incrementar la comunicació entre l'estudiant i el professor, en el desenvolupament d'aquesta assignatura es farà servir el

**Campus**

Digital com a mitjà addicional de comunicació asíncrona.

Els usos habituals del Campus Digital de l'ETSEIB en l'assignatura Fusió Nuclear són:

- Posar qualificacions dels estudiants en els diferents actes d'avaluació.
- Anunci de conferències, videoconferències i seminaris.
- Anunci de canvis de dates o hores, en la programació de l'assignatura: pràctiques, visites tècniques, avaluacions.
- Concertar entrevistes entre professor i estudiant.
- Visualitzar l'historial de l'estudiant.
- Distribuir documentació.
- Anuncis generals (ofertes de treballs, ofertes de beques, notícies relatives a l'enginyeria nuclear, ..)

**Càrrega setmanal de l'estudiant en hores:**

Tipus d'activitat / Setmana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
Teoria																
Pràctiques																
Problemes																
Activitat No presencial																
Treball individual																
Treball en grup																
Proves i exàmens																
Altres activitats																
<b>TOTAL</b>																

**Metodologia docent:****CLASSES TEÒRIQUES I D'EXERCICIS.**

A les exposicions a l'aula es desenvolupa el contingut de les diferents lliçons que constitueixen el programa, incloent la realització d'exercicis que permetin fixar i quantificar els conceptes presentats.

Per millorar l'aprofitament d'aquestes sessions, el professorat farà servir transparències que permeten enriquir gràficament les idees principals de l'exposició. Amb antelació suficient es distribuiran als estudiants exemplars en paper de les transparències, facilitant la concentració en les explicacions i evitant la necessitat de prendre excessives notes.

Es distribuirà material multimèdia relatiu a l'assignatura.

**PROJECCIÓ DE DOCUMENTALS.**

Per il·lustrar els aspectes tecnològics d'alguns temes, el desenvolupament dels mateixos es complementa amb la projecció de diversos documentals.

- Fusió per confinament magnètic.
- Materials superconductors emprats en el reactor Tore Supra.
- JET, Joint European Torus.

**PRÀCTIQUES.**

Per afavorir l'aprofitament de l'assignatura s'ha preparat el conjunt de pràctiques descrit anteriorment.

**Bibliografia Bàsica:**

1. Raeder, J. (1986): *Controlled nuclear Fusion, fundamentals of its utilization for energy supply*, Wiley & Sons, New York, 316 pàgs.
2. Wesson, J. (2004): "Tokamaks", Oxford Science publications, Clarendon press- Oxford, 680 pag.
3. Dolan, J.J. (1982): *Fusion research*. Pergamon Press, (tres volumens).
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.

**Bibliografia Complementària:**

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.

**Criteri d'avaluació:**

L'avaluació es realitza assignant un pes a les diferents activitats desenvolupades en el marc de l'assignatura, tal com s'indica en

l'expressió següent. Es considera l'assistència a les classes i conferències convidades (A), les memòries presentades per els estudiants corresponents a cada treball pràctic (MP), l'assistència a les pràctiques (AP), la participació en la visita tècnica (V). La qualificació final (NF) s'obtindrà amb la següent expressió:

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

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

Els cinc crèdits ECTS corresponents a aquesta assignatura comptabilitzen com a formació nuclear per a la obtenció de l'European Master of Science in Nuclear Engineering (EMSNE) impulsat per l'European Nuclear Education Network (ENEN).

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