

17-18

PROGRAMA DE DOCTORADO EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

# GUÍA DE ESTUDIO PÚBLICA



## PROTECCIÓN RADIATIVA Y SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE ACELERADORES DE ALTA INTENSIDAD DESTINADOS A SIMULAR EL DAÑO POR IRRADIACIÓN DE MATERIALES EN REACTORES DE FUSIÓN NUCLEAR

CÓDIGO 28801462



Ámbito: GUJ - La autenticidad, validez e integridad de este documento puede ser verificada mediante el "Código Seguro de Verificación (CSV)" en la dirección <https://sede.uned.es/valida/>



9870B2AB27C4DDDF2D8B444651C451309

17-18

PROTECCIÓN RADIATIVA Y SEGURIDAD  
EN EL DISEÑO DE ACELERADORES DE  
ALTA INTENSIDAD DESTINADOS A  
SIMULAR EL DAÑO POR IRRADIACIÓN DE  
MATERIALES EN REACTORES DE FUSIÓN  
NUCLEAR

CÓDIGO 28801462

## ÍNDICE

PRESENTACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN  
REQUISITOS Y/O RECOMENDACIONES PARA CURSAR ESTA  
ASIGNATURA  
EQUIPO DOCENTE  
HORARIO DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE  
COMPETENCIAS QUE ADQUIERE EL ESTUDIANTE  
RESULTADOS DE APRENDIZAJE  
CONTENIDOS  
METODOLOGÍA  
SISTEMA DE EVALUACIÓN  
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA  
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA  
RECURSOS DE APOYO Y WEBGRAFÍA



Nombre de la asignatura	PROTECCIÓN RADIATIVA Y SEGURIDAD EN EL DISEÑO DE ACCELERADORES DE ALTA INTENSIDAD DESTINADOS A SIMULAR EL DAÑO POR IRRADIACIÓN DE MATERIALES EN REACTORES DE FUSIÓN NUCLEAR
Código	28801462
Curso académico	2017/2018
Títulos en que se imparte	PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES (máster seleccionado) / MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
Tipo	
Nº ETCS	0
Horas	0.0
Periodo	SEMESTRE
Idiomas en que se imparte	

## PRESENTACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

La línea de investigación en la que aquí se encuadra el Trabajo fin de máster es la de *Protección radiactiva y seguridad en el diseño de aceleradores de alta intensidad destinados a simular el daño por irradiación de materiales en reactores de fusión nuclear*, y en concreto se refiere a los aceleradores integrantes de la instalación de irradiación EVEDA/IFMIF. Esta línea se oferta desde el Departamento de Ingeniería Energética y se incluye dentro del itinerario denominado también Ingeniería Energética. Las razones que a continuación se exponen justifican y avalan la relevancia del desarrollo de la instalación EVEDA/IFMIF para el desarrollo de la energía de fusión nuclear dentro del contexto internacional. En la actualidad no se dispone de materiales aptos para ser utilizados en las futuras centrales de fusión nuclear, al no satisfacer las dos propiedades básicas que se les exige: ser resistentes al daño producido por la exposición a la radiación a la que se van a ver sometidos, y al mismo tiempo ser materiales de activación reducida, es decir, que posibiliten un comportamiento atractivo de la fusión en lo que respecta a temas de seguridad y producción/gestión de residuos radiactivos.

El desarrollo y calificación de nuevos materiales capaces de resistir la extraordinariamente exigente exposición neutrónica (flujos muy intensos, fluencias muy altas y neutrones de 14 MeV de energía) existente en los futuros reactores comerciales de fusión nuclear es un paso esencial para llegar al reactor (DEMO) que debería suceder al ITER y tendría que demostrar la eficiencia de la conversión de energía de fusión en electricidad.

Mientras el daño causado por irradiación será del orden de 30 dpa (1 dpa, desplazamiento por átomo, significa que cada átomo en el material es desplazado en promedio 1 vez de su posición en la red cristalina, provocando defectos estructurales) al año para el DEMO, será solo de 3 dpa al final de toda la vida operacional de ITER. Es en este contexto donde surge la necesidad de alguna instalación de irradiación que sea capaz de simular las condiciones de daño esperables en un reactor de fusión y haciendo uso de ella poder desarrollar los materiales idóneos a utilizar en la construcción de los mismos.

El Proyecto denominado Internacional Fusion Material Irradiation Facility, IFMIF, es que tiene por objetivo el diseño y construcción de dicha instalación de irradiación.

El empuje definitivo al Proyecto IFMIF tuvo lugar en el año 2007. Durante las negociaciones para la localización del ITER, los distintos países participantes en el Proyecto evaluaron el



interés de establecer un programa completo sobre energía de fusión. Fruto de ello, y en paralelo al ITER se decidió la aprobación del “Broader Approach”/“Enfoque Ampliado a la Investigación en la Energía de Fusión” firmado entre la UE y Japón, con fecha de entrada en vigor el 1 Junio de 2007, cubriendo tres grandes proyectos: IFMIF-EVEDA, el tokamak superconductor JT60-SA y el centro de computación IFERC.

IFMIF, es una fuente de neutrones de alta intensidad que se va a construir en la próxima década para desarrollo y cualificación de materiales para futuros reactores de fusión. La instalación incluye dos aceleradores que deben producir dos haces de deuterones (de 40 MeV y 125 mA cada uno) que impactan de forma continuada en un blanco de litio líquido cediendo una potencia de 10MW, para dar lugar a un chorro de neutrones de alta intensidad a energías de 14 MeV. Este tipo de instalación/acelerador supone en muchos aspectos avances de dos órdenes de magnitud en relación a los aceleradores del mismo tipo existentes en la actualidad.

La implementación de un proyecto tan ambicioso requiere como primera fase de la construcción de prototipos de los principales sistemas: IFMIF-EVEDA (Engineering Validation Engineering Design Activities) incluye tres grandes módulos de trabajo: prototipo de acelerador, blanco de litio y celdas de ensayo. Las actividades, planeadas y con financiación ya comprometida para un periodo de seis años, serán compartidas entre grupos de trabajo de Japón y la Unión Europea. La contribución de España al Proyecto IFMIF-EVEDA es muy importante, siendo responsable de varias actividades y participante en otras varias. En relación a las actividades de radioprotección y seguridad del diseño del acelerador EVEDA-IFIMF España es corresponsable junto a Francia del desarrollo de las mismas.

La importancia del trabajo de fin de máster se ve reflejado en el número de créditos ECTS del mismo, 15, y en las horas de dedicación que debe emplear el estudiante, unas 375 horas de trabajo. Y como se quiere remarcar, la finalización de este trabajo debe ser fruto de su madurez en las materias técnicas del master así como en las competencias adquiridas.

## REQUISITOS Y/O RECOMENDACIONES PARA CURSAR ESTA ASIGNATURA

Para poder realizar el Trabajo fin de máster en la línea de investigación sobre *Protección radiactiva y seguridad en el diseño de aceleradores de alta intensidad destinados a simular el daño por irradiación de materiales en reactores de fusión nuclear*, el estudiante ha de seleccionar las asignaturas a cursar de acuerdo a las siguientes directrices:

- MODULO I: Las 4 asignaturas del Módulo
- MODULO II del Itinerario en Ingeniería Energética: Las 3 asignaturas del Módulo
- MODULO III del Itinerario en Ingeniería Energética: Tres de las 10 asignaturas optativas del Módulo.

Para la inicialización del Trabajo no es condición necesaria que haya tenido que aprobar previamente ninguna de las asignaturas del Máster, pero sí que es necesario en la práctica que domine muchos de los conceptos impartidos en algunas de las asignaturas asignadas a la línea de investigación, y fundamentalmente de las asignaturas del MODULO II del



Itinerario en Ingeniería Energética denominadas Seguridad e impacto medioambiental de instalaciones de fusión nuclear y Tecnologías para la gestión de residuos radiactivos. Además, es necesario tener conocimientos suficientes para lectura en inglés técnico. Y sería recomendable, el conocimiento de algún lenguaje de programación en un nivel medio. Los lenguajes de programación con los que se puede trabajar son C, Fortran y Python, bajo entornos UNIX y PC.

## EQUIPO DOCENTE

Nombre y Apellidos  
Correo Electrónico  
Teléfono  
Facultad  
Departamento

FRANCISCO M. OGANDO SERRANO  
fogando@ind.uned.es  
91398-8223  
ESCUELA TÉCN.SUP INGENIEROS INDUSTRIALES  
INGENIERÍA ENERGÉTICA

Nombre y Apellidos  
Correo Electrónico  
Teléfono  
Facultad  
Departamento

JAVIER SANZ GOZALO  
jsanz@ind.uned.es  
91398-6463  
ESCUELA TÉCN.SUP INGENIEROS INDUSTRIALES  
INGENIERÍA ENERGÉTICA

Nombre y Apellidos  
Correo Electrónico  
Teléfono  
Facultad  
Departamento

PATRICK SAUVAN -  
psauvan@ind.uned.es  
91398-8731  
ESCUELA TÉCN.SUP INGENIEROS INDUSTRIALES  
INGENIERÍA ENERGÉTICA

Nombre y Apellidos  
Correo Electrónico  
Teléfono  
Facultad  
Departamento

RAFAEL JUAREZ MAÑAS  
rjuarez@ind.uned.es  
91398-8223  
ESCUELA TÉCN.SUP INGENIEROS INDUSTRIALES  
INGENIERÍA ENERGÉTICA

Nombre y Apellidos  
Correo Electrónico  
Teléfono  
Facultad  
Departamento

MAURICIO GARCIA CAMACHO  
maurigarcia@ind.uned.es  
91398-6470  
ESCUELA TÉCN.SUP INGENIEROS INDUSTRIALES  
INGENIERÍA ENERGÉTICA

## HORARIO DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE

La tutorización y el seguimiento de los aprendizajes se realizarán a través del curso virtual. Asimismo la prueba de evaluación correspondiente a la terminación de la fase de aprendizaje se hará utilizando esta plataforma. También se pueden realizar consultas a los profesores de la asignatura personalmente o por teléfono en el siguiente horario:

D. Javier Sanz

Martes, de 16 a 20 h.

Dpto. de Ingeniería Energética, ETS de Ingenieros Industriales, despacho 2.18



Tel.: 91 398 64 63

Correo electrónico: jsanz@ind.uned.es

D. Francisco Ogando

Jueves de 16,00 a 20,00 h.

Dpto. de Ingeniería Energética, ETS de Ingenieros Industriales, despacho 0.15

Tel.: 91 398 82 23

Correo electrónico: fogando@ind.uned.es

D. Patrick Sauvan

Martes, de 16,00 a 20,00 h.

Dpto. de Ingeniería Energética, ETS de Ingenieros Industriales, despacho 0.16

Tel.: 91 398 87 31

Correo electrónico: psauvan@ind.uned.es

D. Juan Pablo Catalán Pérez

Martes y jueves de 16,00 a 18,00 h.

Dpto. de Ingeniería Energética, ETS de Ingenieros Industriales, despacho 0.15

Tel.: 91 398 82 09

Correo electrónico: jpcatalan@bec.uned.es

D. Rafael Juárez Mañas

Martes y jueves de 16,00 a 18,00 h.

Dpto. de Ingeniería Energética, ETS de Ingenieros Industriales, despacho 0.15

Tel.: 91 398 82 23

Correo electrónico: rjuarez@ind.uned.es

Además de estos medios de tutorización a distancia, se realizarán videoconferencias cuando sea provechoso para estudiantes. El periodo de mayor interacción entre profesor y estudiante se prevé durante la primera etapa del trabajo, mientras en la segunda fase se espera que el alumno trabaje de modo más independiente para llevar a cabo la resolución del problema identificado en la primera fase, en la que se le dotó de la teoría necesaria y de la capacitación para hacer uso de las herramientas computacionales apropiadas.

## COMPETENCIAS QUE ADQUIERE EL ESTUDIANTE

## RESULTADOS DE APRENDIZAJE

El objetivo final es que el estudiante: i) seleccione por sí mismo alguno de los posibles escenarios asociados a la operación normal o anormal del acelerador susceptibles de tenerse en consideración en la evaluación de la radioprotección/seguridad de la instalación, ii) evalúe el efecto del mismo en termino de dosis a los trabajadores y al público; y iii) aporte medidas de diseño o rediseño para hacer la instalación atractiva de acuerdo al criterio ALARA (As Low As Reasonably Achievable). A partir de este objetivo final, se establecen los objetivos puntuales que a continuación se exponen y enlazan de forma secuencial.

Objetivos de conocimiento



- Conozca los posibles escenarios de riesgo frente a las que hay que proteger a los trabajadores y al público en situaciones normales de operación del acelerador: problemática asociada a la Radioprotección.
- Conozca los posibles escenarios de riesgo que puedan acontecer en situaciones anormales de operación del acelerador y frente a los que hay que asegurar la protección de los trabajadores y el público en general: problemática asociada a la Seguridad.

Objetivos de habilidades y destrezas

- Priorice los escenarios de riesgo en función de su relevancia en las evaluaciones de radioprotección.
- Priorice los escenarios de riesgo en función de su relevancia en las evaluaciones de seguridad.
- Priorice los escenarios de riesgo relevantes para la radioprotección en función del grado de desarrollo realizado para su evaluación.
- Priorice los escenarios de riesgo relevantes para la seguridad en función del grado de desarrollo realizado para su evaluación.
- Seleccione y defina el escenario o escenarios a investigar por su relevancia de cara a la evaluación de la radioprotección y/o seguridad de IFMIF-EVEDA.
- Justifique la selección en función de la su posible relevancia en la evaluación de la seguridad/radioprotección de IFMIF-EVEDA, de la nueva aportación que suponga, y de la disponibilidad de los recursos que pudieran necesitarse.
- Comprender cómo se integran los diferentes elementos (programas/códigos de simulación y bases de datos) computacionales constituyentes del sistema de cálculo a utilizar en la evaluación de la seguridad, impacto medioambiental y radioprotección de los aceleradores de alta intensidad tipo IFMIF-EVEDA.
- Capacidad de utilizar códigos de transporte para caracterizar los escenarios de irradiación presentes en los materiales de los distintos componentes del acelerador y en el sistema absorbedor/beam-dump del haz.
- Capacidad de utilizar códigos de activación para caracterizar el inventario radiactivo y las correspondientes fuentes de radiación en los diferentes materiales del acelerador EVEDA/IFMIF y del absorbedor/beam-dump del haz al ser expuestos a los campos de irradiación correspondientes.

Objetivos de actitudes

- Proponer una metodología de resolución (modelización de la situación real) apropiada para evaluar las dosis asociadas al escenario potencial de riesgo que se quiere analizar.
- Proponer el sistema computacional adecuado para realizar el análisis de radioprotección/seguridad del escenario objeto del trabajo.
- Identificar las posibles limitaciones que presenten los códigos y bases de datos que integrarían el sistema computacional propuesto para abordar el problema.



- Calcular las dosis asociadas al escenario problema.
- Evaluar los resultados en término de la problemática que puedan representar para los trabajadores y para el público en general.
- Proponer medidas de diseño o de rediseño si estas ya existieran previamente al trabajo, que permitan una respuesta más atractiva de la instalación en términos del criterio ALARA.
- Establecer el rango de validez de las soluciones aportadas en función de las limitaciones del sistema computacional utilizado.
- Establecer, si fuera preciso, las necesidades de desarrollo teórico y/o experimental para una solución aceptable del problema.

## CONTENIDOS

## METODOLOGÍA

El plan diseñado para la realización satisfactoria de este trabajo de máster incluye básicamente dos etapas que serán evaluadas independientemente.

- Etapas de aprendizaje.
- Asimilación del problema a resolver y pasos a seguir para ello.
- Aprendizaje básico de uso de las herramientas computacionales que se utilizarán.
- Etapas de ejecución.
- Cálculo de flujos neutrónicos y de partículas cargadas (iones ligeros) en operación.
- Cálculo de activación de materiales.
- Análisis de protección radiológica y/o seguridad.

La primera fase del trabajo se iniciará con el repaso de los conceptos relativos a la instalación IFMIF-EVEDA tratados en la asignatura del máster *Seguridad e impacto medioambiental de instalaciones de fusión nuclear* y con la lectura de documentos relacionados con dicha instalación y su importancia en el campo de la fusión nuclear.

Seguidamente se ha de seleccionar y definir en detalle el problema que se pretende tratar.

Para ello tendrá que estudiar cuales son los principales componentes y escenarios que en operación normal y anormal pueden ser relevantes de cara a la protección radiológica de la instalación.

El estudio de esta primera etapa se realizará mediante documentación proporcionada por el equipo docente, y será un periodo de fuerte interacción con el mismo. Para ello se utilizarán las herramientas de docencia a distancia proporcionadas por la UNED.

La otra parte fundamental de esta primera etapa contempla el aprendizaje de uso de tres programas informáticos muy utilizados en investigación: dos de transporte de partículas (MCNPX y PHITS) y otro de cálculos de activación/inventario isotópico (ACAB). El estudiante tendrá que hacer uso seguro de ellos para abordar cualquier de los problemas que plantee como objeto del trabajo





El tiempo estimado de desarrollo de esta etapa es de 100 horas de trabajo colaborativo/en estrecha relación con el profesor, tras lo cual se realizaría, también con medios telemáticos, una prueba mediante la cual se evaluaría la capacidad del estudiante de proceder a la resolución del problema planteado, y pasar por tanto al desarrollo de la segunda etapa. La segunda fase del trabajo consistirá en realizar los cálculos pertinentes para determinar dosis y realizar la evaluación del impacto del escenario operacional elegido de la instalación respecto a la protección radiológica. Será un trabajo fundamentalmente computacional e independiente del profesor, si bien tendrá en ese periodo toda la asistencia informática para llevar a cabo los cálculos. Dichos cálculos tendrán que realizarse utilizando computadores del departamento de Ingeniería Energética, si bien el acceso podrá ser remoto a mayor conveniencia del estudiante.

La estimación de horas de trabajo en esta fase es la siguiente: cálculos de transporte de iones ligeros y flujos neutrónicos más cálculo de dosis (50h), cálculos de activación (100h), cálculos de transporte de radiación gamma y dosis (50h) y elaboración del trabajo final de análisis (75h). Con ello se completan las 375h (15 ECTS) asignadas a la tarea.

Indicar que desde un principio se animará al estudiante a que conozca los recursos bibliográficos disponibles en Biblioteca de la UNED, debiéndose entender estos en su doble vertiente: documentación propiamente dicha a la que se puede acceder y procedimientos para llevar a cabo una gestión eficiente en el proceso de obtención de dicha documentación.

## SISTEMA DE EVALUACIÓN

### BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

La bibliografía básica para este trabajo serán apuntes elaborados y material proporcionado por el equipo docente del Departamento de Ingeniería Energética/área Ingeniería Nuclear y cubrirá las siguientes facetas:

- Introducción y descripción funcional básica de componentes de la instalación IFMIF.

Estudios de radioprotección y seguridad de aceleradores de alta intensidad tipo

EVEDA/IFMIF.

Diciembre 2007.

Coordinador J. Sanz.

Basados en: J. Sanz et al. Evaluation of neutron production, neutron flux neutron induced activation and dose rates in the EVEDA accelerator prototype EFDA Task: TW6-TTMI- 004 Deliverable 3. Final Report. UNED, Sept. 2007.

- Manuales de usuario simplificados y adaptados para manejo de los programas a utilizar en los estudios de radioprotección de IFMIF-EVEDA: i) para códigos de transporte de



partículas (MCNPX y PHITS) y ii) para cálculos de activación (ACAB).

## BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

J. Sanz,

Seguridad e impacto medioambiental de instalaciones de fusión nuclear. Metodología de análisis y aplicaciones,

Universidad Nacional de Educación a Distancia, Departamento de Ingeniería Energética, Ingeniería Nuclear, UNED/DIE-IN 4.0, Noviembre 2002. Rev. Oct. 2007

## RECURSOS DE APOYO Y WEBGRAFÍA

La realización de este trabajo requiere el uso de herramientas computacionales que no están al alcance del público en general. Su uso se gestionará dentro del marco de la plataforma virtual de la UNED, si bien se hará uso de algunos computadores del departamento de Ingeniería Energética. Por parte del estudiante, se espera la disponibilidad de un computador para trabajo con conexión a internet. En el caso de tener que instalar aplicaciones específicas de comunicación por red, se darán al estudiante instrucciones adecuadas, así como direcciones de acceso a software libre disponible.

---

## IGUALDAD DE GÉNERO

En coherencia con el valor asumido de la igualdad de género, todas las denominaciones que en esta Guía hacen referencia a órganos de gobierno unipersonales, de representación, o miembros de la comunidad universitaria y se efectúan en género masculino, cuando no hayan sido sustituido por términos genéricos, se entenderán hechas indistintamente en género femenino o masculino, según el sexo del titular que los desempeñe.

