9-10

GUÍA DE ESTUDIO DE LDI

TECNOLOGIA NUCLEAR II (T.E.)

CÓDIGO 01106366

UNED

9-10

TECNOLOGIA NUCLEAR II (T.E.)

CÓDIGO 01106366

ÍNDICE

OBJETIVOS
CONTENIDOS
EQUIPO DOCENTE
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA
SISTEMA DE EVALUACIÓN
HORARIO DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE
PRÁCTICAS
IGUALDAD DE GÉNERO

OBJETIVOS

Esta asignatura parte del conocimiento previo de Tecnología Nuclear I, en la cual el alumno ha tomado contacto con el ciclo del combustible nuclear y sus diversas fases, y conocer los fundamentos de las centrales nucleares.
Esta segunda asignatura de Tecnología Nuclear se centra en lo esen-cialmente nuclear de estas centrales, es decir, el reactor. Este compo-nente posee unas peculiaridades muy singulares, basadas en la neutró-nica y en la interacción de los neutrones con la materia, que es lo que constituye el cuerpo de la doctrina de la asignatura. Aunque se supone que el alumno ha adquirido conocimientos nucleares adecuados en las asignaturas de Física Nuclear, la neutrónica es un campo absoluta-mente nuevo para él, que necesita todo el desarrollo que se dedica a ella durante las cinco primeras *Unidades* de la asignatura.
Con ellas se pretende que el alumno conozca sin dudas cualitativas y con notable precisión cuantitativa el comportamiento del reactor, su evolución cinética y la distribución espacial de sus principales magnitudes físicas, como el flujo neutrónico y la densidad de potencia.
Es conveniente ponerse en contacto con el profesor al inicio del curso.

CONTENIDOS

UNIDAD DIDÁCTICA I. Teoría de la difusión neutrónica
TEMA 1.**Difusión de neutrones térmicos.** 1.1. Introducción y plan-teamiento. 1.2. Los parámetros nucleares del rango térmico.
1.2.1. Distribución maxweliana de energías. 1.2.2. Tasa de reacciones en el rango térmico. 1.2.3. Casos prácticos en reactores térmicos. 1.3. El término de fugas en la ecuación de la difusión.
1.4. Ley de Fick. Coeficientes de difusión. 1.5. Discusión de la ecuación de difusión. 1.5.1. Recorrido libre medio de transporte.
1.6. Condiciones de contorno y de continuidad. 1.6.1. Condición de vacio. 1.6.2. Condiciones de continuidad. 1.7. Fuentes singulares. 1.8. Resolución analítica de la ecuación de difusión.
1.8.1. Problemas de fuente. 1.9. Problemas generales en teoría de difusión. 1.9.1. Principio de superposición. 1.9.2. El caso mate-máticamente homogéneo en teoría de difusión. 1.9.3. El proble-ma general no homogéneo en teoría de difusión. 1.9.4. Métodos numéricos. (Reactores Nucleares; capítulo 8).
UNIDAD DIDÁCTICA II. Moderación de neutrones
TEMA 2.**Moderación de neutrones.** 2.1. Introducción y planteamien-to. 2.2. Análisis de la dispersión elástica. 2.3. Análisis de la coli-sión inelástica. 2.4. Moderación en medios infinitos sin absor-bentes. 2.4.1. Moderación en hidrógeno. 2.4.2. Moderación en un medio infinito sin absorbentes, con A>1. 2.5. Teoría de la Edad de Fermi. 2.5.1. Resolución de la Ecuación de Fermi. 2.6. Probabilidad de escape a las resonancias. 2.6.1. Moderación en un medio infinito de hidrógeno con absorbentes puros. 2.6.2. Integral de resonancia. 2.6.3. Efecto de la temperatura en las absorciones en las resonancias. 2.7. Teoría de la Edad de Fermi generalizada. 2.8. Tiempo de moderación y ciclo neutrónico. (Reactores Nucleares; capítulo 9).
UNIDAD DIDÁCTICA III. El reactor térmico homogéneo

TEMA 3.**Teoría del reactor térmico homogéneo.** 3.1. Introducción.
3.2. Criticidad del reactor térmico homogéneo. 3.2.1. Tamaño crítico y masa crítica. 3.2.2. Influencia de la composición en la criticidad del reactor. 3.2.3. Reactores submoderados. 3.3. Lapla-cianos material y geométrico. 3.4. Cálculo de laplacianos geomé-tricos. 3.4.1. Optimación de geometría de reactores. 3.5. El flujo neutrónico en el reactor térmico homogéneo. (Reactores Nuclea-res; capítulo 10).
TEMA 4.**Cálculo de reactores.** 4.1. Introducción y planteamiento. 4.2. Cálculo analítico en dos grupos neutrónicos. 4.2.1. Determi-nación de los coeficientes. 4.2.2. Ecuación de balance. 4.2.3. El reactor térmico crítico estudiado con dos grupos de neutrones.
4.3. Cálculo en multigrupos. Métodos computacionales. 4.4. El problema nucleónico. 4.4.1. Los coeficientes nucleares en el rango rápido. 4.4.2. Secciones eficaces efectivas en el rango térmico.
4.5. La ecuación de difusión en multigrupos. 4.5.1. Condiciones de contorno y continuidad. Planteamiento numérico. 4.6. Resolución de la ecuación de difusión en multigrupos. 4.7. Comentarios finales. (Reactores Nucleares; capítulo 11).

UNIDAD DIDÁCTICA IV. El reactor térmico heterogéneo

TEMA 5.**El reactor térmico heterogéneo.** 5.1. Introducción. 5.2. Neutrónica de la celda estructural. 5.2.1. El factor de utilización térmica. 5.2.2. Probabilidad de escape a las resonancias. 5.2.3. Factor de fisión rápida. 5.3. Efectos de la heterogeneidad estruc-tural. 5.4. Cálculo neutrónico del reactor heterogéneo. (Reac-tores Nucleares; capítulo 12).

UNIDAD DIDÁCTICA V. Cinética de reactores nucleares

TEMA 6.**Irradiación neutrónica y materiales.** 6.1. Introducción: quemado. 6.2. Evolución isotópica. Planteamiento general.
6.2.1. Evolución de los actínidos. 6.2.2. Productos de fisión.
6.2.3. Productos de activación. 6.3. Efectos del quemado en la reactividad. 6.3.1. Consumo de combustible nuclear. 6.3.2. Envenenamiento por xenon-135. 6.3.3. Envenenamiento por samario-149. 6.3.4. Venenos consumibles. 6.4. Efectos de la irra-diación en los materiales. 6.4.1. Efectos en el combustible. 6.4.2. Efectos en los metales. (Reactores Nucleares; capítulo 13).
TEMA 7.**Cinética de reactores nucleares.** 7.1. Objetivo del análisis cinético. 7.2. Neutrones inmediatos y diferidos. 7.3. Plantea-miento del análisis cinético. 7.4. Ecuaciones de balance neutró-nico. 7.5. Aproximación de cinética puntual. 7.5.1. Ecuación característica de la cinética 7.5.2. Importancia cinética de los neutrones diferidos. 7.5.3. Período asintótico del flujo neutróni-co. 7.6. Determinación de las constantes de integración. 7.7. Cinética del reactor con una sola familia de diferidos. 7.7.1. Ejemplos de inserciones de reactividad. 7.7.2. Valoración de la importancia de los diferidos. 7.8. Estudios de cinética del reactor.
7.8.1. Notas sobre la transformada de Laplace. 7.8.2. Resolución de las ecuaciones cinéticas. 7.9. Calibración de procesos cinéticos. (Reactores Nucleares; capítulo 15).

UNIDAD DIDÁCTICA VI. Complementos sobre reactores nucleares

TEMA 8.**Termohidráulica de reactores nucleares.** 8.1. Introduc-ción y planteamiento. 8.2. Análisis térmico de la barrita de combustible. 8.3. Análisis térmico del canal de refrigeración.
8.4. Régimen hidráulico del refrigerante. 8.5. Balance térmico del reactor. Perfiles de temperatura. (Reactores Nucleares; capítulo 14).

TEMA 9.**Dinámica del reactor nuclear.** 9.1. Introducción y plantea-miento. 9.2. Variables de estado de un reactor. 9.3. Efecto Dop-pler. 9.4. Coeficientes de reactividad. 9.5. Efecto de reactividad de los moderadores líquidos. 9.6. Otros efectos de reactividad. 9.7. Resumen sobre la realimentación de reactividad. 9.8. Análisis dinámico del reactor nuclear. 9.9. Potencia del reactor en función de la reactividad. 9.9.1. Problema inverso de la dinámica: la reac-tividad en función de la historia de la potencia. 9.10. Caracteri-zación física de la realimentación. 9.10.1. Caso de incremento de potencia constante. 9.10.2. Casos con sobrepotencia. 9.10.3. Va-riables de estado fundamentales. 9.11. Estabilidad lineal. 9.11.1. Efecto Doppler. Contribución a la estabilidad. 9.11.2. Efecto del moderador. Caso del agua ligera. 9.11.3. Efecto de la temperatura del grafito. 9.12. Modelo dinámico lineal de un reactor PWR.

9.12.1. Efecto del boro disuelto en el agua de los PWR. 9.13. Estabilidad de los reactores de agua en ebullición, BWR. 9.14. Realimentaciones positivas de reactividad. 9.15. Reactores RBMK (tipo Chernobyl). (Reactores Nucleares; capítulo 14)

TEMA 10.**Control de reactores.** 10.1. Objetivo y función del control.

10.2. Elementos de control en un reactor. 10.3. Sistemas de protección del reactor. 10.3.1. Control general de la planta. (Reactores Nucleares; capítulo 17).

El objetivo de esta asignatura es el reactor nuclear. A través de los estudios de Física Nuclear el alumno ha tomado conocimiento de las propiedades y mecanismos interesantes que involucran al núcleo ató-mico. Con Tecnología Nuclear I ha visto qué materias primas ofrecen características explotables para obtener energía útil a partir de la ener-gía nuclear, y ha estudiado cómo se encadenan las diversas fases del ciclo del combustible nuclear, por lo cual sabe de qué materiales se parte y por qué, y así mismo sabe cuál es el resultado de la extracción de energía: junto a los kilovatios/hora queda el combustible irradiado y los residuos radiactivos, sobre cuyo tratamiento y gestión hay varias alternativas.

En Tecnología Nuclear I ha quedado asimismo claro que las centra-les nucleares son el centro del ciclo: en ellas se produce la energía y en ellas se amplifica la radiactividad natural. Estas centrales son concep-tualmente similares a una térmica clásica, con la salvedad fundamen-tal, junto a otras de ella derivadas, de que en vez de caldera de com-bustible dispone de un reactor nuclear. Éste es, como se ha dicho, el objeto de la asignatura. Conviene hacer unas observaciones generales antes de comentar cada *Unidad Didáctica,* pues en esta asignatura resul-ta más importante comprenderla en su totalidad como una síntesis global que saber los detalles de cada tema. Con ello no debe el alum-no hacer caso omiso de los detalles, porque si no parte de ellos, difí-cilmente podrá llegar a una síntesis válida. Ahora bien, el alumno no debe quedarse meramente en los detalles pues, adoptando el símil del refrán, los árboles pueden taparle el bosque, y en este caso el bosque es de suma importancia. ¿Por qué?

Porque el reactor es uno. Es un solo sistema en cuyo seno ocurre un número elevadísimo de reacciones nucleares por segundo, inducidas por una gran población de neutrones libres, que precisamente se han desagregado de los núcleos atómicos a través de una reacción precisa-mente: la fisión. Fisión, que como se ha estudiado ya en Física Nuclear II y Tecnología Nuclear I, libera energía, produce neutrones y amplifi-ca la radiactividad originaria de su combustible. Pero el reactor es tam-bién uno en tanto que hay que extraer la

energía generada a través de la pertinente refrigeración, lo cual, a su vez debido a la temperatura del medio repercute en las tasas de las reacciones nucleares, realimentán-dose los efectos nuclear y termohidráulico, lo cual es un factor de extraordinaria importancia en la dinámica del reactor. Que también lo es uno en cuanto que la radiactividad en el contenido es función de la energía generada, y dicha radiactividad ha de ser confinada en el seno del reactor para que ni en condiciones accidentales llegue en cantida-des inadmisibles al medio ambiente humano.

De estos últimos aspectos se ocupa la asignatura Seguridad Nuclear y Protección Radiológica. La presente asignatura trata del reactor en sí (no de sus perjuicios potenciales), y para ello ha de centrarse en la neu-trónica pues, como se ha dicho, son los neutrones quienes inducen las reacciones nucleares y, por tanto, quienes mantienen vivo el reactor.

El neutrón, a su vez, se mantiene vivo (es decir, sin ataduras a un núcleo) durante un tiempo brevísimo, menor de la diezmilésima de segundo, y a lo largo de esa vida, que es muy larga medida en tiempos nucleares característicos, el neutrón atraviesa una serie de vicisitudes que vienen a conformar el llamado ciclo neutrónico. En una primera fase cronológica, los neutrones van perdiendo energía con el medio, en lo que se denomina **Moderación.** Una vez termalizados, es decir, una vez que los neutrones están con la mínima energía posible, que es la de agitación térmica del medio material, los neutrones se *difunden* a través de dicho medio hasta ser absorbidos o hasta fugarse, sucesos que representan la muerte del neutrón. Pero bastantes de las absorciones serán fisiones, lo cual multiplicará la población neutrónica, iniciándo-se una nueva generación. A todo este proceso, introducido aquí muy someramente para guiar al alumno, se dedican las tres primeras *Uni-dades Didácticas.*

Permutando, en aras del interés académico, se comienza estudian-do la **Difusión** en la *Unidad Didáctica 1.* El alumno verá que aquí se llega a una ecuación suficientemente precisa para describir cómo se distribuye en el espacio la población neutrónica, lo cual es esencial para poder calcular la densidad de potencia (KW/litro) en cada punto del reactor.

Dicha ecuación, junto a otras relaciones matemáticas del choque elástico de los neutrones contra los núcleos, van a servir para estudiar la **Moderación** en la *Unidad Didáctica 2*. Gracias a ella sabremos cómo van perdiendo velocidad los neutrones hasta convertirse en neutrones térmicos, que son los que demuestran mayor apetencia de fisionar núcleos de U-235.

Pero la Moderación y la Difusión, como bien se intuye, no son fases disjuntas, sino al contrario, fuertemente relacionadas: es lo que el alumno verá en la *Unidad Didáctica 3*, al estudiar el **Ciclo Neutró-nico** (con mucha precisión numérica) aplicado a un **Reactor Homo -géneo** por ser académicamente más sencillo y altamente ilustrativo. En esta lección se conjunta la Moderación y la Difusión para dar la neutrónica (estática) total del reactor: los neutrones moderados son el término fuente de la ecuación de la Difusión de neutrones térmicos; a su vez, estos neutrones térmicos inducen fisiones de las que se libe-ran los neutrones rápidos que son el término fuente de la ecuación de la Moderación.

Por razones tanto físicas como tecnológicas, los reactores reales son **Heterogéneos,** que son los estudiados en la *Unidad Didáctica 4*, dado que presentan peculiaridades muy diferenciadas respecto de los **Ho-mogéneos,** pero con ello no es de esperar que el alumno encuentre dificultades.

Tampoco las encontrará en el planteamiento de la siguiente *Unidad Didáctica,* sobre **Cinética y Control** de reactores. Es obvio que los reac-tores, como cualquier sistema físico, sufren alteraciones temporales, y es preciso conocer éstas. Aquí sí conviene hacer una advertencia al alumno, de carácter macroscópico, que puede guiarle en el estudio: hay que diferenciar dos tipos de alteraciones temporales: las que con-curren en períodos muy cortos, del orden de la vida del neutrón libre, que afectan a la cinética de la neutrónica y a su estabilidad; y las alte-raciones producidas en plazos más largos, como son las variaciones en la composición isotópica, que no inciden tan dramáticamente en la cinética porque el reactor se va amoldando a ellas, aunque tienen una influencia a largo plazo que el alumno estudiará.

La última *Unidad Didáctica* tiene realmente dos partes muy diferen-ciadas. La primera hace referencia a la instrumentación neutrónica del reactor y al uso de ésta para proteger al reactor contra excesos de potencia. Aquí el alumno tendrá que recordar conceptos ya expuestos en Instrumentación nuclear y en Electrónica, pero comprenderá el contenido de esta lección como continuación lógica de la Cinética y Control.

La segunda parte es un complemento a la *Unidad Didáctica 6* de Tec-nología Nuclear I, en la que se estudiaron los reactores comercializados y su tipología. En este caso, y como remate futurista que puede tener ciertas dificultades de comercialización, se introducen aquí los Reacto-res Rápidos, que permitirían una mayor explotación del uranio, pero que presentan ciertas características problemáticas que el alumno no tendrá dificultad en comprender tras haber asimilado el cómo y el por qué funcionan los reactores nucleares.

EQUIPO DOCENTE

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

ISBN(13):9788436249491
Título:INGENIERÍA NUCLEAR: PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL VÍA INTERNET (1ª)
Autor/es:
Editorial:U.N.E.D.

ISBN(13):9788474841190
Título:REACTORES NUCLEARES (1ª)
Autor/es:
Editorial:UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Libros de texto:

MARTÍNEZ-VAL, J. M., y PIERA, M.: *Reactores Nucleares. Madrid.* Ed. Sección de Publicaciones de la ETSII de la UPM. (Tel.: 91 336 30 68).

Cuaderno de Prácticas:

SANZ GOZALO, J., OGANDO SERRANO, F. y RODRÍGUEZ CALVO, A.:
Ingeniería Nuclear: prácticas de simulación computacional vía Internet.
Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2003.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

ALONSO, A. y otros: *La energía nuclear en sus aspectos básicos.* Madrid. Ed. SNE, 1984.
CARO, R.: *Física de reactores nucleares.* Madrid. Ed. JEN, 1979.
GODED, F. y otros: *Teoría de reactores y elementos de ingeniería nuclear (vols. I y II)*. Madrid. Ed. JEN, 1975.
LIGOU, J.: *Installations nucleaires.* Laussanne. Ed. Presses Polytechni-ques Romandes, 1980.
NERO, AQ. V.: *A guide book to nuclear reactors.* Berkeley. University of California Press, 1979.
GLASSTONE, S., y SESONSKE, A.: *Nuclear Reactor Engineering.* Nueva York. Van Nostrand Reinhold Pub. Co., 1981.
TANARRO, A.: *Instrumentación nuclear*. Madrid. Ed. JEN, 1973.

SISTEMA DE EVALUACIÓN

La evaluación del curso se realiza atendiendo fundamentalmente a las Pruebas Personales, pero es imprescindible decir que éstas tienen una estructura exactamente análoga a las *Pruebas de Evaluación a Dis-tancia*, conservándose también la similitud en el tipo de preguntas rea-lizadas, sean objetivas o de ensayo. (Es decir, no se prevén problemas de desconcierto de los alumnos ante las Pruebas Personales si han rea-lizado con cierta atención las evaluaciones).
Conviene indicar además que por la naturaleza de la asignatura tienen considerable relevancia las preguntas de ensayo que suponen el desarrollo de un tema, el análisis de algún proceso físico o los comentarios de discusión e interrelación entre varios puntos.

HORARIO DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE

D.ª Mireia Piera Carreté
Lunes, de 16 a 20 h.
Tel.: 91 398 64 70
Local: ETS Ingenieros Industriales

Prácticas de simulación computacional vía Internet:
D. Javier Sanz Gozalo
Martes, de 16 a 20 h. Tel. 91 398 64 63 Correo electrónico: jsanz@ind.uned.es

PRÁCTICAS

Son obligatorias para poder aprobar la asignatura. Se realizarán en instalaciones afines a los contenidos de la asignatura. Un componente de las mismas consistirá en simulaciones computacionales que se podrán realizar a través de la *web* o en el propio Departamento, y que estarán basadas en el Cuaderno de Prácticas anteriormente indicado.
El calendario de prácticas se comunicará, por la Secretaría de la Escuela, a los alumnos matriculados en la asignatura.
Con el fin de poder organizar adecuadamente estas prácticas, el alumno deberá remitir antes del 15 de noviembre al profesor de la asignatura en la Sede Central la ficha correspondiente.

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 se hayan sustituido por términos genéricos, se entenderán hechas indistintamente en género femenino o masculino, según el sexo del titular que los desempeñe.