

INGENIERÍA DE REACTORES NUCLEARES

Samuel Glasstone
Alexander Sesonske

EDITORIAL REVERTÉ

INGENIERÍA DE REACTORES NUCLEARES

INGENIERÍA DE REACTORES NUCLEARES

Samuel Glasstone
Alexander Sesonske



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:
Nuclear Reactor Engineering

Edición original en lengua inglesa publicada por
P. Van Nostrand Company, Inc.

Copyright © P. Van Nostrand Company, Inc., U.S.A.

Versión española por
Dr. M. Carreira
Investigador de la Junta de Energía Nuclear, Madrid

Edición en papel:
© Editorial Reverté, S. A., 1990
ISBN 978-84-291-4035-4

Edición ebook (PDF):
© Editorial Reverté, S. A., 2021
ISBN 978-84-291-9042-7

Propiedad de:
EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B
08029 Barcelona. ESPAÑA
Tel: (34) 93 419 33 36
e-mail: reverte@reverte.com
www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

PRÓLOGO

El objeto de este libro es la descripción de los principios fundamentales, científicos y tecnológicos, de los sistemas de reactores nucleares. Se dedica principal atención al proyecto de reactores y comportamiento de los mismos, en relación con el proceso de fisión y radiaciones asociadas, con preferencia a otras zonas de la ingeniería que no son exclusivas de los reactores nucleares. El libro está destinado preferentemente para servir de texto en un curso de introducción, de dos semestres, para estudiantes graduados. En consecuencia, el tratamiento seguido se adapta a las condiciones de aquellos alumnos que han completado un curriculum de ingeniería a nivel medio.

El proyecto de un reactor nuclear es una tarea muy compleja que requiere la cooperación de varios grupos de especialistas, correspondiendo a cada grupo la responsabilidad de un aspecto determinado del proyecto (neutrónico, estabilidad y control, transmisión de calor, blindaje contra radiaciones, componentes estructurales, etc.). Ahora bien, como estos aspectos particulares dependen en gran parte unos de otros, es necesario que el ingeniero disponga de una perspectiva general muy amplia de todo el campo de la ingeniería nuclear, antes de especializarse en una rama determinada. Proporcionar tal perspectiva es justamente uno de los objetivos de este libro.

Desde que se escribió el predecesor de este libro, en 1955, la tecnología de reactores nucleares ha alcanzado progresos muy considerables. Entonces era posible, por ejemplo, describir en cincuenta páginas las características de todos los reactores conocidos, incluyendo varios de ellos en fase de proyecto. En la actualidad, la simple enumeración de los reactores nucleares de que se tiene noticia ocuparía no pocas páginas, mientras que su descripción completa exigiría los límites de un voluminoso tratado. Ocurre, además, que son varios los casos en que se han desarrollado métodos diferentes, todos ellos satisfactorios, para la solución de problemas tecnológicos planteados en el proyecto de reactores. Por todo ello, no cabe en este libro una descripción detallada y completa de lo que ya es una tecnología complicada y madura, pero sí podrá ser útil —anteriormente se ha indicado— como guía a través de conceptos básicos, en campos estrechamente relacionados entre sí. El libro podrá interesar, asimismo, a los profesionales de otras ramas de la ingeniería que deseen una idea del impacto producido por la energía nuclear en el campo de sus propias actividades.

Al preparar este libro, hemos recibido ayuda y sugerencias de numerosas personas, a las que deseamos expresar nuestra gratitud. La relación de sus nombres figura a continuación en páginas aparte. Merecen también nuestra gratitud varios miembros de la A. E. C., División of Technical Information, en particular, J. G. Gratton, Chief, y J. D. Cape y G. K. Ellis, Scientific Publications Branch, por su valiosa ayuda en la adquisición de materiales no publicados, obtención de revisiones del manuscrito original y otras muchas formas, así como C. R. Bruce y W. J. Pearson, Publishing Branch, Oak Ridge, por su trabajo en las ilustraciones. Muy agradecidos igualmente al Dr. N. E. Brandbury, Director, y a P. F. Belcher, Assistant Director, Los Alamos y Scientific Laboratory, por su cortesía al poner a nuestra disposición las excelentes instalaciones de dicho centro, y a los doctores O. B. Hall, Division Leader, y R. P. Hammond y R. M. Kiehn, K (Reactor) Division, por su valiosa cooperación. Finalmente, A. Sesonske desea agradecer a su esposa la ayuda y aliento prestados.

*Los Alamos, New Mexico
Agosto, 1962*

SAMUEL GLASSTONE
ALEXANDER SESONSKE

RECONOCIMIENTO

Los autores desean expresar su gratitud a las siguientes personas que contribuyeron, de una forma u otra, a la revisión del manuscrito original:

- Adler, K. L., Atomics International
Alexander, L. G., Oak Ridge Natl. Lab.
Arnold, E. D., Oak Ridge Natl. Lab.
Ashley, R. L., Atomics International
Babb, A. L., University of Washington
Bernsen, S. A., Advanced Technology Labs.
Billington, D. S., Oak Ridge Natl. Lab.
Blanco, R. E., Oak Ridge Natl. Lab.
Blizard, E. P., Oak Ridge Natl. Lab.
Brand, G. E., Atomics International
Brinkman, J. A., Atomics International
Budney, G. S., Atomics International
Bump, T. R., Argonne Natl. Lab.
Burnett, T. J., Oak Ridge Natl. Lab.
Bush, S. H., Hanford Atomic Products
Operation, G. E. Co.
Cohen, E. R., Atomics International
Chapman, R. H., Oak Ridge Natl. Lab.
Cheverson, R. D., Oak Ridge Natl. Lab.
Davis, F. W., Southwest Research Inst.
Davis, M. V., Atomics International
DeBear, W. S., Atomics International
Denham, R. S., Atomics International
Dickinson, R. W., Atomics International
Dietrich, J. R., General Nuclear Engineering Corporation
DiNunno, J. J., AEC, Div. of Licensing and Regulation
Dunenfeld, M., Atomics International
Dunning, G. M., AEC, Div. of Operational Safety
Eggen, D. T., Atomics International
Etherington, H., Allis-Chalmers Manufacturing Company
Falk, E. D., Atomics International
Fillmore, F. L., Atomics International
Fisher, W. L., Atomics International
Foster, K. W., Atomics International
Fromm, L. W., Argonne Natl. Lab.
Gimera, R. J., Atomics International
Glasgow, L. E., Atomics International
Golan, S., Atomics International
Gresky, A. T., Oak Ridge Natl. Lab.
Griffin, C. W., Atomics International
Gross, E. E., Oak Ridge Natl. Lab.
Grossman, N., AEC, Div. of Compliance
Grotenhuis, M., Argonne Natl. Lab.
Guthrie, C. E., Oak Ridge Natl. Lab.
Gylfe, J. D., Atomics International
Hallet, W. J., Atomics International
Iskenderian, H., Argonne Natl. Lab.
Jarrett, A. A., Atomics International
Kann, W. J., Argonne Natl. Lab.
Keen, R. T., Atomics International
Kelber, C., Argonne Natl. Lab.
Kerze, F., AEC, Div. of Reactor Development
Kolba, V. M., Argonne Natl. Lab.
Kuhn, D. W., AEC, Div. of Operations Analysis and Forecasting
Lafyatis, P. G., Oak Ridge Natl. Lab.
Lane, J. A., Oak Ridge Natl. Lab.
Lang, J. C., Atomics International
Lemcoe, M. M., Southwest Research Inst.
Lennox, D. H., Argonne Natl. Lab.
Lesch, F. R., Atomic Power Development Associates Inc.
Link, L. E., Argonne Natl. Lab.
Lowell, E. G., Atomics International
Lyon, R. N., Oak Ridge Natl. Lab.
MacFarlane, D. R., Argonne Natl. Lab.
Mahlmeister, J. E., Atomics International
Marable, J. H., Oak Ridge Natl. Lab.
Marron, J. F., Atomics International
Mattern, K. L., Atomics International
McArthy, A. E., Argonne Natl. Lab.
Meem, J. L., University of Virginia
Mims, L. S., Atomics International

Moon, D. P., Argonne Natl. Lab.	Shimazaki, T., Atomics International
Murbach, E. W., Atomics International	Siegel, S., Atomics International
Naymark, S., Atomic Products Division, G.'E. Co.	Sinizer, D. I., Atomics International
Nelson, L., Oak Ridge Natl. Lab.	Spencer, S. C., Atomics International
Nestor, C. W., Oak Ridge Natl. Lab.	Stelle, A. M., Atomics International
Osborn, R. K., University of Michigan	Stockdale, W. G., Oak Ridge Natl. Lab.
Pennington, E., Argonne National Lab.	Sturm, R. G., Strum-Krouse, Inc.
Persiani, P., Argonne Natl. Lab.	Sutton, C. R., International Nickel Co.
Prohammer, F. G., Argonne Natl. Lab.	Tobias, M., Oak Ridge Natl. Lab.
Richards, R. B., Atomic Products Division, G. E. Co.	Uhrig, R. E., University of Florida
Roberts, H., Alco Products, Lnc.	Ullmann, J. W., Oak Ridge Natl. Lab.
Rosen, F. D., Atomics International	Weber, C. E., Atomics International
Ross, D. M., AEC, Div. of Operational Sa- fety	Weills, J. T., Argonne Natl. Lab.
Rossin, A. D., Argonne Natl. Lab.	Wett, J. S., AEC, Div. of Reactor Devel- opment
Royden, H. N., Atomics International	Whan, G. A., University of New Mexico
	Young, H. D., Argonne Natl. Lab.
	Zack, J. F., Atomics International

Como era imposible incorporar todas las sugerencias hechas, los autores aceptan la exclusiva responsabilidad del material contenido en este libro.

SAMUEL GLASSTONE
ALEXANDER SESONSKÉ

INDICE ANALÍTICO

Capítulo 1. Introducción a la ingeniería de reactores nucleares	1
INTRODUCCIÓN	1
Recursos energéticos mundiales, 1; Importancia de la energía de fisión, 1.	
ESTRUCTURA ATÓMICA	2
Número atómico y número másico, 2; Isótopos, 3.	
ENERGÍA NUCLEAR Y FUERZAS NUCLEARES	5
Energía de enlace, 5; Estabilidad nuclear, 8; Radioactividad, 10; Reacciones neutrónicas, 12.	
FISIÓN NUCLEAR	14
El proceso de fisión, 14; Energía de fisión, 15; Masa crítica, 18.	
REACTORES NUCLEARES DE FISIÓN	18
Características generales de los reactores nucleares, 18; Tipos de reactores, 20; Ciclo del combustible nuclear, 22; Evolución histórica de los reactores, 23.	
 Capítulo 2. Radiaciones y reacciones nucleares	 32
INTRODUCCIÓN	32
RADIOACTIVIDAD	32
Isótopos radioactivos, 32; Velocidad de desintegración radioactiva, 33; Equilibrio radioactivo, 36; Unidades de radioactividad: curie, 39; Rayos gamma, 41; Radiación de enfrenamiento, 43.	
INTERACCIÓN DE LAS PARTÍCULAS ALFA Y BETA CON LA MATERIA	44
Radiaciones ionizantes, 44; Absorción de partículas alfa, 45; Absorción de partículas beta, 48; Radiación de Cerenkow, 51.	
INTERACCIÓN DE RAYOS GAMMA CON LA MATERIA	52
Introducción, 52; Efecto fotoeléctrico, 52; Producción de pares, 54; Atenuación de rayos gamma, 55; Coeficiente de atenuación y energía de la radiación gamma, 56.	
INTERACCIÓN DE LOS NEUTRONES CON LA MATERIA	61
Producción de neutrones, 61; Reacciones neutrónicas: absorción, 62; Reacciones de captura radiativa, 63; Emisión de partículas alfa, 64; Reacciones con neutrones rápidos, 65; Dispersión in-	

elástica, 65; Dispersión elástica, 67; Distribución de Maxwell-Boltzmann, 68; Alteraciones estructurales provocadas por interacciones neutrónicas, 72.	
SECCIONES EFICACES DE LAS REACCIONES NEUTRÓNICAS	72
Significado de las secciones eficaces, 72; Sección eficaz macroscópica, 73; Determinación de reacciones eficaces por el método de transmisión, 76; Velocidades de reacción neutrónicas, 77; Determinación de secciones eficaces por el método de activación, 78; Camino libre medio, 80; Sistemas neutrónicos polienérgéticos, 81.	
VARIACIÓN DE LAS SECCIONES EFICACES CON LA ENERGÍA NEUTRÓNICA.	86
Resultados experimentales, 86; Interpretación teórica: absorción de resonancia, 88; Secciones eficaces de dispersión, 89; Secciones eficaces para neutrones de alta energía, 90; Secciones eficaces	
EL PROCESO DE FISIÓN	92
para neutrones térmicos, 91. Mecanismo de la fisión nuclear, 92; Secciones eficaces de fisión, 96; Velocidad de fisión y potencia de un reactor, 96; Neutrones y rayos gamma de fisión, 98; Neutrones retardados, 101; Productos de fisión, 103; Radioactividad y desintegración de los productos de fisión, 105; Acumulación de determinados productos de fisión, 111.	
Capítulo 3. Difusión y moderación de neutrones	118
INTRODUCCIÓN	118
Balance neutrónico, 118; Difusión de neutrones, 119.	
DIFUSIÓN DE NEUTRONES	120
Teoría de transporte, 120; Aproximación de la teoría de difusión, 121; Cálculo del escape de neutrones, 123; Ecuación de difusión, 124; Solución de la ecuación de difusión: condiciones en los límites, 125; Distancia extrapolada, 127; Difusión de neutrones monoenergéticos procedentes de una fuente puntual, 129; Longitud de difusión, 131; Determinación de la longitud de difusión, 133; Fuente plana infinita en un medio de espesor finito, 136.	
MODERACIÓN DE NEUTRONES	138
Dispersión elástica, 138; Variación de energía en la dispersión, 141; Ley empírica de dispersión, 143; Decremento energético logarítmico medio, 144; Poder moderante y relación de moderación, 146; Letargia, 147.	
MODERACIÓN DE UN MEDIO INFINITO	149
Distribución energética sin absorción, 149; Distribución energética con absorción, 151.	
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE NEUTRONES MODERADOS	153
Fermi (moderación continua), modelo de la edad, 153; Ecuación de la edad, 155; Solución de la ecuación de la edad: significado de la edad, 157; Longitudes de moderación y emigración, 161.	

Capítulo 4. Teoría de reactores: estado estacionario	166
CONDICIÓN DE CRITICIDAD	166
Factores de multiplicación, 166; Fórmula de los cuatro factores, 167; Ecuación de criticidad para un grupo, 171; Ecuación de criticidad para dos grupos, 173; Modelo de la difusión-edad, 175; Tamaño crítico, 178; Reactores de diversas formas, 180; Probabilidades de permanencia, 182; Factor de multiplicación efectivo, 186.	
REACTORES CON REFLECTOR,	187
Efectos del reflector, 187; Método para un grupo de neutrones, 188; Ahorros por reflector, 190; Métodos de varios grupos, 193.	
SISTEMAS REACTORES HOMOGÉNEOS	196
Factor de multiplicación infinito, 196; Cálculo del tamaño crítico, 202.	
SISTEMAS REACTORES HETEROGÉNEOS	208
Introducción, 208; Cálculo de la utilización térmica, 209; Cálculo de la probabilidad de escape a la resonancia, 214; Factor de fisión rápida, 219; Determinación de la red óptima, 221.	
SISTEMAS RETICULARES LIGERAMENTE ENRIQUECIDOS, MODERADOS POR AGUA	222
Introducción, 222; Modelo modificado de los cuatro factores, 222; Cálculo de f y η , 224; Probabilidades de escape a la captura, 227; Factor de fisión rápida, 228; Probabilidades de permanencia, 229; Factor de multiplicación infinito y laplaciana, 230.	
REACTORES RÁPIDOS	232
Introducción, 232; Ecuaciones para varios grupos, 233; Cálculo de la laplaciana, 238; Composición del reactor y masa crítica, 240.	
DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL TAMAÑO CRÍTICO	246
Conjunto crítico, 246; Experimento exponencial, 248.	
Capítulo 5. Control de los reactores nucleares	256
CINÉTICA DE REACTORES	256
Introducción, 256; Vida neutrónica, 256; Ecuaciones cinéticas de un reactor desnudo: Teoría de un grupo, 259; Período estable de reactor, 263; Un solo grupo de neutrones, 264; Un solo grupo de neutrones retardados: Reactividad negativa, 270; Reactividad y período: Reactividad positiva, 272; Reactividad y período: Reactividades negativas, 275; Fórmula de la hora inversa, 275; Condición de criticidad por neutrones instantáneos, 277.	
EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA REACTIVIDAD	280
Consideraciones generales, 280; Sistemas homogéneas, 281; Sistemas heterogéneos, 282; Probabilidades de permanencia, 284; Coeficientes de temperatura del reactor, 286.	
ENVENENAMIENTO POR PRODUCTOS DE FISIÓN	290

Efecto de los venenos sobre la reactividad, 290; Envenenamiento por xenón durante el funcionamiento del reactor, 292; Envenenamiento por xenón tras la parada del reactor, 295; Inestabilidad por xenón, 298; Envenenamiento por samario, 299; otros venenos producidos por fisión, 301.	
CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONTROL DE REACTORES	302
Principios básicos de control, 302; Métodos de control, 303; Materiales de control, 304; Circuito de control, 307.	
DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	309
Especificación del sistema de control, 309; Funciones de las barras de control, 310; Alcance del sistema de control, 312; Efecto de temperatura, 312; Agotamiento del combustible, 313; Envenenamiento por productos de fisión, 313; Especificaciones de reactividad, 313; Efectividad de las barras de control, 315; Calibrado de las barras de control, 319; Coeficiente de peligro y oscilador de pila, 321.	
ANÁLISIS DE SISTEMAS REACTORES	322
Introducción, 322; Representación por la transformada de Laplace, 324; Constante de tiempo del sistema combustible-moderador, 325; Funciones de transferencia, 326; Función de transferencia de la cinética de los reactores, 330; Realimentación por coeficiente de temperatura negativo, 333; Funciones de transferencia del circuito de refrigeración, 336; Análisis de estabilidad, 338; Comportamiento transitorio en operación normal, 338; Simuladores de reactores, 339; Comportamiento transitorio en operación anormal, 340.	
INSTRUMENTACIÓN PARA EL CONTROL DE REACTORES	340
Introducción, 340; Producción de pares iónicos, 341; Comportamiento de los pares iónicos en un campo eléctrico, 342; Cámaras de ionización, 344; Contadores proporcionales, 350.	
REACTORES EN FUNCIONAMIENTO	351
Instrumentos de diversos alcances, 351; Puesta en marcha inicial, 355; Puesta en marcha tras parada instantánea, 358; Puesta en marcha en el intervalo de potencia, 359; Operación normal del reactor, 359; Parada del reactor, 360.	
Capítulo 6. Extracción de energía	367
PROBLEMAS TÉRMICOS EN EL PROYECTO DE REACTORES	367
Introducción, 367; Generación y transmisión de calor en sistemas reactores, 368; Problemas térmicos peculiares, 369.	
PROYECTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	371
Circuitos refrigerantes, 371; Distribución de las fuentes de calor, 372; Distribución de temperaturas, 373; Problemas térmicos auxiliares, 374.	
FUENTES DE CALOR EN SISTEMAS REACTORES	375

Energía de fisión, 375; Distribución espacial de fuentes energéticas en el núcleo de un reactor, 377; Potencias máxima y media en un canal simple de combustible, 379; Aplanamiento del flujo y de la potencia, 380; Generación de calor en el moderador, 380; Generación de calor en reflector y blindaje, 381.	
PRINCIPIOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR	381
Conducción y convección, 381; Conducción de calor en una placa infinita con condiciones de convección en los límites, 385; Conducción de calor en un cilindro hueco con condiciones de convección en los límites, 386; Transferencia de calor por radiación, 388.	
TRANSMISIÓN DE CALOR EN SISTEMAS CON FUENTES INTERNAS	390
Generalización de una placa unidimensional, 390; Conducción en una placa infinita con fuente uniforme, 391; Transmisión de calor en placas combustibles envainadas, 393; Transmisión de calor en elementos combustibles cilíndricos envainados, 395; Transmisión de calor en blindajes y vasijas de presión. Placa con fuente calorífica exponencial, 399; Resistencias de contacto entre sólidos, 401; Conducción en componentes de geometría irregular, 402.	
DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA DE UN REFRIGERANTE NUCLEAR	403
Canal de refrigeración generalizado, 403; Distribución coseno de la fuente en dirección longitudinal, 406; Factores de canal caliente, 410.	
CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN DE CALOR Y FLUIDOS	411
Regímenes laminar y turbulento, 411; Predicción de coeficientes de transmisión de calor para fluidos ordinarios en régimen turbulento, 414; Coeficientes de transmisión de calor para metales líquidos en régimen turbulento, 416; Coeficientes de transmisión de calor en la convección libre, 420; Efectos de entrada, 421.	
TRANSMISIÓN DE CALOR A LÍQUIDOS EN EBULLICIÓN	421
Ebullición en superficie y en volumen, 421; Ebullición en sistemas reactores, 424; Predicción de condiciones de quemado destructivo, 425; Coeficientes de transmisión de calor por ebullición, 427; Intercambio de calor en sistemas de vapor, 430.	
FLUIDOS CONTENIENDO UNA FUENTE VOLUMÉTRICA DE CALOR	430
Transmisión de calor en combustibles circulantes, 430.	
HIDRÁULICA DE REACTORES	431
Caídas de presión debidas a fricción, 431; Caída de presión bifásica, 436; Efecto de la ebullición local sobre la caída de presión, 436; Caída de presión y refrigeración por convección libre, 438; Potencia de bombeo en sistemas de refrigeración, 440.	
REFRIGERANTES NUCLEARES	442
Características generales, 442; Comparación de refrigerantes respecto a sus características de transmisión de calor, 444; El agua como refrigerante, 446; El agua pesada como refrigerante, 447;	

Los metales líquidos como refrigerantes, 447; Refrigerantes orgánicos, 451; Sales fundidas, 452; Refrigerantes gaseosos, 452.

Capítulo 7. Moderadores y materiales de estructura para reactores	463
INTRODUCCIÓN	463
Problemas de materiales, 463.	
EFFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LOS MATERIALES	464
Principios generales, 464; Desplazamientos atómicos, 465; Espigas térmicas y de desplazamiento, 467; Efectos debidos a la captura neutrónica, 468; Efectos físicos de la irradiación, 469; Efectos de la irradiación sobre compuestos orgánicos, 470.	
MATERIALES DE ESTRUCTURA	474
Características generales, 474; Materiales para reactores térmicos, 476; Materiales para reactores rápidos, 478; Aceros inoxidables, 479; Aceros al carbono, 480; Zirconio, 482.	
MATERIALES MODERADORES Y REFLECTORES	484
Introducción, 484; Grafito, 485; Barilio, 489; Oxido de berilio, 491; Agua ordinaria, 492; Agua pesada, 493; Descomposición del agua por irradiación, 493; Materiales orgánicos, 496; Hidruro de zirconio, 496.	
CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	496
Corrosión y erosión, 496; Elección de materiaes, 498; Reacciones químicas, 499.	
 Capítulo 8. Combustibles nucleares	 503
INTRODUCCIÓN	503
Ciclo del combustible, 503; Materiales combustibles, 504.	
PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES NUCLEARES	505
Fuentes de uranio, 505; Producción de uranio y sus compuestos, 507; Separación de los isótopos del uranio, 509; Torio, 513; Plutonio, 514.	
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA ELEMENTOS	514
Introducción, 514; Uranio metálico, 515 Dióxido de uranio, 520; Carburo de uranio, 524; Combustibles en dispersión, 526; Materiales combustibles de plutonio, 528; Materiales combustibles de torio, 531; Vainas de elementos combustibles, 532; Materiales de ligamento, 534.	
REPROCESADO DE COMBUSTIBLES IRRADIADOS	535
Introducción, 535; Enfriamiento de elementos combustibles irradiados, 536; Tratamientos previos, 539; Disolución del combustible, 541.	
TRATAMIENTO DE SEPARACIÓN	542
Introducción, 542; Química de los elementos pesados, 543; Principios generales de la extracción líquido-líquido, 545; Proceso	

Purex, 547; Cambio iónico, 549; Separaciones por volatilización, 543; Procesos pirometalúrgicos, 555.	
ELIMINACIÓN DE RESIDUOS	556
Residuos líquidos, 556; Residuos gaseosos, 558; Residuos sólidos, 558.	
Capítulo 9. Protección contra las radiaciones y seguridad de reactores	563
RIESGOS DE IRRADIACIÓN Y FÍSICA SANITARIA	563
Problemas de irradiación en el proyecto y funcionamiento de reactores, 563; Actividades de física sanitaria, 565.	
EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES	566
Exposición aguda y crónica, 566; Exposición parcial y total, 567; Efectos de los distintos tipos de radiaciones, 568; Exposición a radiaciones originadas en el interior de cuerpo, 569; Características generales de la lesión radiológica, 570.	
UNIDADES DE DOSIS DE RADIACIÓN	571
El Roentgen, 571; Absorción de energía en el aire 572; Dosis por unidad de tiempo e intensidad de la fuente radiactiva, 575; Unidades <i>rad</i> y <i>rem</i> , 578; Fijos equivalentes de las dosis biológicas por unidad de tiempo, 508.	
PATRONES DE PROTECCIÓN RADILÓGICA	581
Normas de protección contra las radiaciones, 581; Normas de concentración de radioactividad, 582; Dosis de radiación agudas, 583;	
PROTECCIÓN DEL PERSONAL	584
Control a distancia, 584; Medidas de seguridad, 585; Instrumentos monitores, 586; Monitores de aire y agua: Instrumentos fijos, 587; Inspección de radiaciones: Instrumentos portables, 589; Control del personal, 592, Instrumentos para la inspección del personal, 596.	
SEGURIDAD DE REACTORES	597
Introducción, 597; Selección de emplazamiento, 598; Características de seguridad, 598; Confinamiento o contención, 600; Autorización de reactores en los Estados Unidos, 602.	
Capítulo 10. Blindaje de sistemas de reactores nucleares	606
FUNDAMENTOS DEL BLINDAJE DE REACTORES	606
Introducción,, 606; Proyecto de blindajes, 608; Radiaciones de los sistemas reactores, 610; Blindajes térmico y biológico, 613; Exigencias de blindaje para reactores, 614; Materiales de blindaje, 617;	
TRANSFORMACIONES GEOMÉTRICAS UTILIZADAS EN BLINDAJE	622
Fuentes distribuidas y <i>kernel</i> de atenuación puntual 622; Fuente plana circular (disco) isótropa, 623; Fuente superficial esférica e isótropa, 624; Fuente superficial cilíndrica e isótropa, 626.	

ATENUACIÓN DE RADIACIONES	627
Factores de acumulación, 627; Longitud de relajación, 631; Puntual exponencial kernel, 633.	
FUENTES DISTRIBUIDAS	634
Radiación procedente de una fuente plana infinita, 634; Fuente plana finita e isótropa, 637; Fuente superficial esférica, 637; Fuente distribuida volumétrica con autoabsorción, 638.	
BLINDAJE DE REACTORES	640
Atenuación de neutrones rápidos, 640; Blindaje de agua, 642; Lecciones eficaces de remoción, 643; Blindajes de hormigón, 646; Atenuación de rayos gamma primarios, 647; Distribución de rayos gamma secundarios, 650; Efecto de blindaje del reflector, 656; Resultados para blindajes agua-hierro, 658; Conclusiones generales, 661.	
MÉTODO DE BLINDAJES DE COMPARACIÓN PARA PROYECTO	662
Introducción, 662; Instalaciones experimentales, 663; Aplicación de las medidas LTSF, 664.	
BLINDAJE POR MEDIOS ANISÓTROPOS	667
Fuente lineal, 667; Fuente cilíndrica, 669; Fuente discoidal, 670.	
BLINDAJE DE FUENTES DE RADIACIÓN GAMMA	670
Cálculo de la intensidad de la fuente, 670; Cálculos de atenuación, 671.	
CALENTAMIENTO DE BLINDAJES POR IRRADIACIÓN	673
Introducción, 673; calentamiento por neutrones, 673; Calentamiento por radiación gamma, 674.	
APÉNDICE	675
Transformaciones geométricas: Fuentes planas, 675; Fuente superficial curva generalizada, 677.	
Capítulo 11. Componentes mecánicos y estructurales	688
INTRODUCCIÓN	688
Requisitos especiales de los sistemas reactores, 688.	
COMPONENTES MECÁNICOS	688
Componentes del ciclo de potencia, 688; Mecanismo de manipulación del combustible, 693; Mecanismo de entretenimiento y desmontaje, 695; Mecanismos de las barras de control, 695.	
COMPONENTES ESTRUCTURALES	696
Introducción, 696; Vasijas de presión, 697; Estructuras de contención, 701.	
TENSIONES TÉRMICAS EN COMPONENTES DE REACTORES	705
Introducción, 705; Tensiones térmicas en una esfera con fuente uniforme, 709; Tensiones térmicas en un cilindro hueco con fuente calorífica nula, 711; Tensiones térmicas en un cilindro hueco con fuente calorífica uniforme, 712; Tensiones térmicas con fuente ca-	

lorífica exponencial, 714 Comparación de materiales, 718; Fluencia, 719.	
PROYECTO DE VASIJAS DE PRESIÓN	720
Introducción, 720; Intensidad de tensión, 721.	
Capítulo 12. Proyecto preliminar de reactores	727
PROCEDIMIENTOS GENERALES DE PROYECTO	727
Introducción, 727; Criterios de proyecto, 728.	
REACTOR DE AGUA A PRESIÓN	730
Características del elemento combustible, 730; Composición del núcleo del reactor, 733; Proyecto nuclear, 735; Barras de control, 738; Programa de administración del combustible, 739; Proyecto del subconjunto de combustible, 740.	
PROYECTO TÉRMICO E HIDRÁULICO	741
Consideraciones generales, 741; Factores calientes, 742; Factor global: Método del producto, 746; Factor caliente global: Método estadístico, 747; Proyecto hidráulico, 748; Datos de proyecto térmicos e hidráulicos del reactor Yankee, 750.	
PROYECTO DE BLINDAJE	750
Criterios de blindaje, 750; Cálculos aproximados de atenuación, 752.	
PROYECTO MECÁNICO	758
Vasija de presión, 758.	
UTILIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE	760
Introducción, 760; Grado de quemado del combustible, 761; Relación de conversión, 765; Administración del combustible, 766; Reproducción, 768.	
CONCLUSIÓN	773
Capítulo 13. Sistemas de reactores nucleares	779
FACTORES DE POTENCIA	779
Introducción, 779; Reactores moderados por agua ordinaria, 782; Reactores de agua en ebullición, 786; Sobrecalentamiento nuclear, 789; Reactores moderados por agua pesada, 791; Control por desplazamiento, 793; Reactores refrigerados por líquido orgánico, 794; Reactores de sodio-grafito, 797; Reactores refrigerados por gas, 800; Reactores moderados por agua pesada y refrigerados por gas, 806; Reactores rápidos, 806.	
REACTORES DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO	813
Introducción, 813; Reactores homogéneos acuosos, 813; Reactores de sales fundidas, 816; Reactor de combustible metálico líquido, 817; Reactores rápidos de combustible líquido, 817.	
GENERADORES ELÉCTRICOS ESPACIALES	818
Introducción, 818; Condiciones generales, 819; Reactores SNAP, 819; Conversión termoiónica, 821; Control lunar, 821.	

REACTORES DE INVESTIGACIÓN DE PRUEBA Y DE ENSEÑANZA	822
Introducción, 822; Reactores de prueba de alto flujo, 823; Reactores de trampa de flujo, 826, Reactores de prueba pulsantes, 828; Reactores de investigación de flujo medio, 829; Reactores de adiestramiento de flujo bajo, 834.	
Capítulo 14. Costos de la energía nuclear	843
INTRODUCCIÓN	843
Importancia de las consideraciones económicas, 843; Problemas que plantea la estimación económica, 844; Energía nuclear competitiva, 844.	
ANÁLISIS DEL COSTO DE LA ENERGÍA NUCLEAR	845
Normalización de costos, 845; Costos de instalación, 846; Cargas fijas, 850; Costos del ciclo del combustible, 853; Validez de la cionamiento y mantenimiento, 868; Optimización de costos, 868; Interrelaciones técnico-económicas, 869; Influencia de la potencia específica y de la densidad de potencia, 872; Programas de administración del combustible, 873; Potencial económico de la energía nuclear, 875.	
APÉNDICE	877
ÍNDICE ALFABÉTICO	887

Capítulo 1

INTRODUCCION A LA INGENIERIA DE REACTORES NUCLEARES

INTRODUCCION

RECURSOS ENERGÉTICOS MUNDIALES

1.1. El descubrimiento de la fisión nuclear, en 1939, fue uno de los acontecimientos que hacen época, ya que abrió el camino a una fuente de energía totalmente nueva, mediante la utilización de la energía interna del núcleo atómico. Los materiales básicos que pueden emplearse para obtener energía nuclear por fisión son los elementos uranio y torio. Estos elementos están contenidos en minerales diversos ampliamente distribuidos por la corteza terrestre, de suerte que, como veremos inmediatamente, representan una fuente potencial de energía muy grande.

1.2. Durante los últimos cincuenta años, las necesidades energéticas del mundo han sido cubiertas por los combustibles fósiles, principalmente carbón, petróleo y gas natural. Ahora bien, se sabe desde hace mucho que estas fuentes de energía se agotarán, prácticamente, en un futuro no muy lejano. En la actualidad, el consumo mundial de energía es del orden de 1×10^{17} Btu por año. Teniendo en cuenta el crecimiento constante de la población mundial, así como el aumento de consumo de energía *per capita*, cabe prever para el año 2000 un ritmo de utilización de energía de cinco a diez veces superior al valor actual. Se ha estimado que las cantidades de carbón, petróleo y gas natural, que pueden extraerse a costos no superiores al doble de los actuales, equivalen en números redondos a 4×10^{19} Btu [1] *. Esto significa que dentro de 100 años, más o menos, las reservas mundiales de combustibles fósiles, económicamente utilizables, estarán próximas a su agotamiento.

IMPORTANCIA DE LA ENERGÍA DE FISIÓN

1.3. Aun concediendo un margen de error a las estimaciones anteriores, resulta inevitable la conclusión siguiente: es preciso buscar nuevas fuentes de

* Los números entre corchetes corresponden a las referencias bibliográficas que figuran al final del capítulo.

energía durante los próximos 50 años o, de lo contrario, la tierra no podrá soportar su ritmo creciente de población con cierto incremento en el nivel de vida. Dos fuentes de este tipo han sido consideradas: energía solar y energía nuclear. Aunque la idea de utilizar en forma más directa la energía del sol es muy atractiva, el desarrollo de procesos adecuados a escala industrial parece algo lejano. La energía nuclear puede obtenerse bien por fisión de los elementos más pesados o bien por fusión de núcleos muy ligeros. Los problemas que plantea la liberación controlada de energía de fusión son formidables y están siendo investigados en la actualidad. En cambio, la fisión nuclear se ha establecido ya como un método práctico para la producción de energía, que competirá económicamente en un futuro próximo con la energía procedente de combustibles fósiles. El objeto de este libro es, justamente, explicar los principios fundamentales que rigen el proyecto y operación de los llamados *reactores nucleares*, dispositivos en los cuales se libera energía de fisión, en forma controlada.

1.4. La cantidad total de materias primas básicas, uranio y torio, existentes en la corteza terrestre hasta una profundidad de cinco kilómetros, es muy grande, posiblemente del orden de 10^{12} toneladas. Ahora bien, gran parte de esta cantidad está contenida en minerales tan pobres que su extracción resultaría prohibitiva. Se estima, en efecto, que las reservas conocidas de minerales de alta calidad no son superiores a 2×10^6 toneladas. En la hipótesis de que el progreso tecnológico consiga reducir los costos de extracción, en minerales de calidad moderadamente baja, a 100 dólares o menos por libra de metal, se ha llegado a la conclusión de que las reservas mundiales —basándose en datos de prospección evidentemente incompletos— son del orden de 20 millones de toneladas de uranio y 1 millón de toneladas de torio [2]. Como veremos a su debido tiempo, es muy improbable que todo este material pueda ser utilizado económicamente en procesos de fisión, pero, en circunstancias favorables, acaso pueda utilizarse una tercera parte.

1.5. Veremos más adelante (§ 1.46) que 1 libra de material fisionable puede producir una cantidad de energía del orden de 3×10^{10} Btu. En consecuencia, la energía que puede obtenerse de las 21×10^6 toneladas de uranio y torio, cuya extracción parece económicamente posible, es del orden de 4×10^{20} Btu. Esta reserva de energía es, pues, muy superior a la correspondiente a combustibles fósiles y puede representar, si se desarrolla adecuadamente, una contribución muy considerable a los recursos energéticos mundiales.

ESTRUCTURA ATOMICA

NUMERO ATOMICO Y NUMERO MASICO

1.6. El funcionamiento de un reactor nuclear depende de diversas interacciones de los neutrones con núcleos atómicos. Con el fin de comprender la naturaleza y características de estas reacciones, conviene considerar —siquiera brevemente— los aspectos fundamentales de la física atómica y nuclear [3, 4].

1.7. El átomo consta de un *núcleo* con carga positiva, rodeado de cierto

número de partículas cargadas negativamente, llamadas *electrones*, de tal modo que, en conjunto, el átomo resulta eléctricamente neutro. Los núcleos atómicos están contruidos a base de dos partículas fundamentales, *protón* y *neutrón*, que se designan frecuentemente con el nombre genérico de *nucleón*. El protón transporta una unidad de carga positiva, igual en magnitud a la carga electrónica. Se identifica, en realidad, con el núcleo del átomo de hidrógeno, es decir, un átomo de hidrógeno que ha perdido su único electrón. El neutrón es ligerísimamente más pesado que el protón (§ 1.13) y, como su nombre indica, se trata de una partícula neutra que no transporta carga eléctrica. Con excepción de los del hidrógeno ordinario, todos los núcleos contienen, además de protones, uno o más neutrones.

1.8. Para un elemento determinado, el número de protones existentes en el núcleo atómico, que es igual al número de cargas positivas que transporta, recibe el nombre de *número atómico* del elemento, y se representa generalmente por la letra Z . Es idéntico al número de orden del elemento en la tabla periódica de los elementos químicos. Así, pues, el número atómico del hidrógeno es 1, el del helio 2, el del litio 3, y así sucesivamente, hasta llegar al número 92 correspondiente al uranio, que es el elemento de masa atómica más elevada, entre todos los existentes en la naturaleza en cantidad apreciable. Cierta número de elementos más pesados que el uranio han sido preparados artificialmente; de éstos, el plutonio (número atómico 94) tiene gran importancia en la producción de energía nuclear.

1.9. El número total de nucleones (protones y neutrones) existentes en el núcleo atómico recibe el nombre de *número másico* del elemento y se representa por la letra A . Como Z es el número de protones, el número de neutrones contenidos en el núcleo atómico vendrá representado por $A - Z$. Por otra parte, como las masas del protón y del neutrón poseen ambas valores muy próximos a la unidad en la escala de masas atómicas, resulta evidente que el número másico es el número entero más próximo a la masa atómica de la especie considerada.

ISÓTOPOS

1.10. Lo que determina la naturaleza química de un elemento es su número atómico, es decir, el número de protones existentes en el núcleo. Esto se debe a que las propiedades químicas dependen de los electrones orbitales en torno del núcleo, y el número de éstos es necesariamente igual al número de protones, ya que el átomo es una entidad eléctricamente neutra. En consecuencia, átomos cuyos núcleos contienen el mismo número de protones (igual número atómico), pero que difieren en número másico, son, desde el punto de vista químico, esencialmente idénticos, si bien presentan con frecuencia marcadas diferencias en sus características nucleares. Tales especies, con idéntico número atómico y diferente número másico, reciben el nombre de *isótopos*. Las especies isotópicas son, en general, químicamente indistinguibles, pero poseen masa atómica diferente.

1.11. Para identificar cada uno de los isótopos de un elemento determinado, se escribe el número másico a continuación del nombre o símbolo del ele-

mento. Así, por ejemplo, el isótopo más abundante del oxígeno, de número másico 16 (núcleo con 8 neutrones y 8 protones), se representa de una de estas formas: oxígeno-16, O-16 u O^{16} . Es conveniente a veces, aunque no necesario, indicar también el número atómico; esto se hace incorporándolo al símbolo del elemento como subíndice, por ejemplo, ${}_8O^{16}$.

1.12. El elemento oxígeno, que hasta 1962 se utilizó como patrón de la escala de masas atómicas, se presenta en la naturaleza como mezcla de tres isótopos, O^{16} , O^{17} y O^{18} , los dos últimos en proporciones relativamente pequeñas. Esta situación originó que se establecieran dos sistemas diferentes para representar las masas atómicas. En la escala química de masas atómicas, se asignó el valor exacto 16,00000 a la masa media (ponderada) de los átomos de los tres isótopos del oxígeno, en las proporciones existentes en la atmósfera. En cambio, otra escala de masas atómicas, la llamada escala física, adoptó como base la asignación de una masa exacta de 16,00000 al isótopo oxígeno-16. Las masas atómicas en esta última escala son, por consiguiente, alrededor del 0,028 por ciento más altas que las correspondientes masas atómicas en la escala química. Desde el 1 de enero de 1962, todas las masas atómicas deberán expresarse en una escala unificada, en la que se asigna el valor exacto 12,00000 al isótopo más abundante del carbono, C^{12} . Esto significa una disminución de 37 partes por millón de las masas atómicas en la escala química y de 318 partes por millón de las masas atómicas en la escala física, ambas anteriormente en uso. Ahora bien, como los nuevos valores tardarán algunos años en introducirse definitivamente en la literatura científica, todas las masas atómicas que se citan en este libro se basan en la antigua escala física (oxígeno-16).

1.13. En física nuclear y disciplinas afines, las masas de los átomos, núcleos y partículas se han expresado invariablemente en la llamada escala física. La unidad de masa atómica (uma) se define, pues, como la dieciseisava parte de la masa del átomo O^{16} exactamente*. En función de una unidad más práctica, 1 uma puede representarse por $1/N_a$ gramos, siendo N_a el número de Avogadro, que es el número de átomos individuales existentes en 16,00000 gramos del isótopo O^{16} (1 átomo-gramo), a saber, $0,6025 \times 10^{24}$. De aquí se deduce que 1 uma es equivalente a $1,660 \times 10^{-24}$ gramos. La masa del protón es 1,007596 uma, o sea, $1,6725 \times 10^{-24}$ gramos, mientras que la del neutrón vale 1,008986 uma, es decir, $1,674 \times 10^{-24}$ gramos. La masa del electrón es solamente 0,000549 uma, o sea, $9,11 \times 10^{-28}$ gramos, lo cual indica que casi toda la masa de un átomo se debe a los protones y neutrones existentes en el núcleo.

1.14. En la actualidad, el uranio es el elemento más importante para la producción de energía nuclear por fisión. Existe en la naturaleza, por lo menos, en tres formas isotópicas, de números másicos 234, 235 y 238. Las proporciones de estos isótopos en el uranio natural, juntamente con sus respectivas masas atómica, figuran en la Tabla 1.1. Como se ve, el uranio-238 es —con mucho— el isótopo más abundante, mientras que el uranio-235 está presente en proporción ligeramente superior al 0,7 %. Ambos isótopos juegan un papel impor-

* Con la adopción de la escala unificada, la unidad de masa atómica se definirá como la doceava parte de la masa del átomo C^{12} exactamente. Las variaciones resultantes del cambio de escala, en los valores que figuran en el texto, son despreciables para lo que ahora se pretende.

tante en la producción de energía nuclear, si bien, como se verá oportunamente, es en realidad el uranio-235 el isótopo directamente utilizable para la liberación de energía de fisión. En cuanto al isótopo más ligero de los tres que figuran en la tabla, uranio-234, se presenta en proporciones tan pequeñas en los minerales uraníferos, que puede ignorarse totalmente a efectos prácticos.

TABLA 1.1. COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL URANIO NATURAL

Número másico	Porcentaje en peso	Masa isotópica (uma)
234.....	0,0058	234,1140
235.....	0,720	235,1175
238.....	99,274	238,1252

1.15. Otro elemento importante desde el punto de vista de la energía nuclear es el torio, de número atómico 90. Se presenta en la naturaleza casi exclusivamente con una sola especie nuclear, de número másico 232. Existen indicios de otras formas isotópicas, pero sus proporciones son despreciables.

ENERGÍA NUCLEAR Y FUERZAS NUCLEARES

ENERGÍA DE ENLACE

1.16. La determinación directa de masas nucleares —o isotópicas— por espectrografía de masas y otros procedimientos, ha demostrado que la masa real de un núcleo es siempre inferior a la suma de masas de los nucleones constituyentes. Esta diferencia, que recibe el nombre de *defecto másico*, guarda estrecha relación con la energía que mantiene ligadas las partículas en el interior del núcleo, y puede determinarse del modo siguiente. Como el átomo es eléctricamente neutro, debe contener Z electrones exteriores al núcleo, además de los Z protones y $A - Z$ neutrones existentes en el interior del mismo. Si representamos por m_p , m_n y m_e las masas del protón, del neutrón y del electrón, respectivamente, la suma de masas de los constituyentes de un átomo será $Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n$. Siendo M la masa observada (isotópica) del átomo, se obtiene para el defecto másico la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Defecto másico} &= [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n] - M \\ &= Zm_H + (A - Z)m_n - M, \end{aligned} \quad (1.1)$$

en la que se ha sustituido $m_p + m_e$ por m_H , masa del átomo de hidrógeno. Como m_H y m_n se conocen con gran precisión, a saber, 1,008145 y 1,008986 uma, respectivamente, resulta que puede calcularse el defecto másico de cualquier especie nuclear —o *núclido*— siempre que se conozca su masa isotópica determinada experimentalmente.

1.17. Según el concepto de *equivalencia entre masa y energía*, consecuencia de la teoría de la relatividad especial, el defecto másico es una medida de la

energía que se pondría en libertad si los Z protones y los $A - Z$ neutrones individuales se combinaran entre sí para formar un núcleo*. Recíprocamente, el defecto másico es numéricamente igual a la energía que sería necesario suministrar al núcleo para romperle en sus nucleones constituyentes. Por esta razón, la energía equivalente al defecto másico recibe el nombre de *energía de enlace* del núcleo.

1.18. Si m es la pérdida de masa en un proceso determinado, la cantidad equivalente de energía puesta en libertad, E , viene dada por la ecuación de Einstein,

$$E = mc^2, \quad (1.2)$$

siendo c la velocidad de la luz. En el sistema absoluto de unidades, $c = 2,998 \times 10^{10}$ cm/s, de modo que la energía vendrá expresada por

$$E \text{ (ergios)} = m \text{ (gramos)} \times 8,990 \times 10^{20}$$

En física nuclear se ha generalizado el uso del electrón-voltio (eV) como unidad de energía; como su nombre indica, es la energía que adquiere la unidad de carga (electrón) cuando se acelera con el potencial de 1 voltio. La carga electrónica vale $1,602 \times 10^{-19}$ culombios, así que 1 eV es equivalente a $1,602 \times 10^{-19}$ julios, o bien, a $1,602 \times 10^{-12}$ ergios; 1 millón de electrón-voltios (1 MeV) es equivalente a $1,602 \times 10^{-6}$ ergios, de suerte que la ecuación (1.3) se transforma en

$$E \text{ (MeV)} = m \text{ (gramos)} \times 5,614 \times 10^{26}$$

Finalmente, para expresar la diferencia de masas m en uma, basta multiplicar el segundo miembro de esta última ecuación por $1,660 \times 10^{-24}$, obteniéndose:

$$E \text{ (MeV)} = 931 m \text{ (uma)} \quad (1.4)$$

1.19. Así pues, de acuerdo con la ecuación (1.4), para obtener el valor numérico de la energía de enlace nuclear, en MeV, basta con multiplicar por 931 el defecto másico, expresado en uma. Más importante que la energía de enlace total (E.E.) es la energía media de enlace por nucleón, que se obtiene dividiendo la primera por el número total de nucleones, es decir, por el número másico A ; de las ecuaciones (1.1) y (1.4) se deduce:

$$\frac{\text{E.E.}}{A} = \frac{931}{A} [1,008145Z + 1,00898(A - Z) - M].$$

En consecuencia, puede calcularse la energía media de enlace por nucleón, en cualquier núcleo, siempre que se conozca su masa isotópica (atómica) M .

* Los Z electrones contribuyen con una pequeña cantidad a la energía de enlace, pero esta contribución ha sido tenida en cuenta, prácticamente, al sustituir $m_p + m_n$ por m_H en la ecuación (1.1).

Ejemplo 1.1. Determinar la energía de enlace por nucleón en: a) estaño-120, para el cual $M = 119,9401$ uma, y b) uranio-235.

a) El número atómico del estaño es 50; por consiguiente, para el núclido de número másico 120, se obtiene:

$$\frac{E.}{A} = \frac{931}{120} [(1,00814 \times 50) + (1,00898 \times 70) - 119,9401]$$

$$= 8,50 \text{ MeV por nucleón.}$$

b) El número atómico del uranio es 92; la masa isotópica del uranio-235, que figura en la tabla 1.1, es 235,1175; por consiguiente,

$$\frac{E.}{A} = \frac{931}{235} [(1,00814 \times 92) + (1,00898 \times 143) - 235,1175]$$

$$= 7,59 \text{ MeV por nucleón.}$$

1.20. Se han representado en la figura 1.1 valores de la energía de enlace por nucleón en diversos núcleos, calculados en la forma que acabamos de describir, en función del número másico. La mayoría de los puntos se distribuyen sobre una curva única, o están muy próximos a ella. Esta curva muestra que, para núcleos de número másico pequeño, la energía de enlace por nucleón es

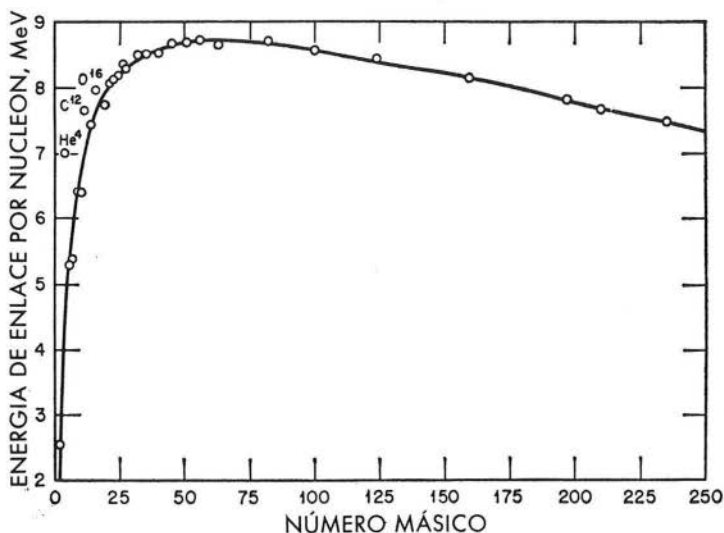


FIG. 1.1. Variación de la energía de enlace por nucleón con el número másico

relativamente baja; aumenta con el número másico, hasta alcanzar un amplio máximo alrededor de los 8 MeV, en la zona de masas comprendida —más o menos— entre 50 y 75; a partir de aquí, la energía de enlace por nucleón disminuye de modo constante. Se demuestra con facilidad (*vid.* § 1.43) que todo proceso en el cual uno o varios núcleos de energía de enlace por nucleón pequeña,

es decir, menos estables, se convierten en otros de energía de enlace por nucleón mayor, esto es, más estables, debe ir acompañado de una cierta liberación de energía. Por consiguiente, resulta claro de la figura 1.1 que debe obtenerse energía por combinación (fusión) de los núcleos más ligeros, o por ruptura (fisión) de los núcleos de número másico más elevado.

ESTABILIDAD NUCLEAR

1.21. La figura 1.2 es una representación del número de neutrones existentes en cada uno de los 270 núcleos estables conocidos, en función del correspondiente número de protones. Se ha representado también la recta diagonal, sobre la que se sitúan los núcleos con igual número de neutrones y protones. Como se ve, en la mayoría de los núcleos estables de número másico pequeño, hasta 40, los números de neutrones y protones son iguales o muy aproximadamente iguales. Dicho de otro modo, la relación neutrón/protón es exactamente la unidad o ligerísimamente superior. En cambio, para valores crecientes del número másico —o atómico— un núcleo es estable cuando contiene mayor número de neutrones que de protones. Así, vemos que en los núcleos estables más pesados, de número atómico superior a 80, la relación neutrón/protón ha subido hasta 1,5.

1.22. Antes de intentar la interpretación de los resultados anteriores, conviene destacar que ciertos núcleos muestran una estabilidad excepcional. Son aquellos que contienen los denominados *números mágicos* de protones (2, 8, 20, 50, 82) o de neutrones (2, 8, 20, 50, 82, 126), indicados en la figura 1.2 por líneas de puntos. Los núcleos que poseen número mágico tanto de protones como de neutrones, se dice que son “doblemente mágicos”; ejemplos de esta clase son ${}^8\text{O}^{16}$, ${}^{20}\text{Ca}^{40}$ y ${}^{82}\text{Pb}^{208}$. Un ejemplo muy ilustrativo de la estabilidad asociada a los números mágicos lo constituye el estaño, cuyo núcleo contiene 50 protones, del cual existen hasta 10 formas isotópicas estables. En general, como se deduce de la figura 1.2, los núclidos mágicos son bastante frecuentes en la naturaleza.

1.23. La especial estabilidad de los núcleos mágicos se atribuye a la presencia de capas completas —o cerradas— de neutrones, de protones o de ambos. Análogamente a lo que ocurre con los elementos inertes helio, neon, argon, etc., los cuales poseen capas cerradas de electrones que les confieren gran estabilidad química, así también las especies nucleares con números mágicos de neutrones o protones muestran una estabilidad nuclear excepcional. Además de los números mágicos que representan capas principales completas, hay también números semimágicos, tales como 6, 14 y 28, que corresponden a una o varias capas cerradas más una subcapa completa. Están comprendidos en esta categoría los isótopos de los elementos carbono y silicio, tan abundantes en la naturaleza.

1.24. Prescindiendo de detalles relacionados con los números mágicos, puede justificarse el carácter general de la figura 1.2 admitiendo la existencia de dos tipos de fuerzas intranucleares. Están en primer lugar las fuerzas atractivas entre nucleones, todas ellas del mismo orden de magnitud, es decir, protones atraen a otros protones, neutrones atraen a neutrones y protones atraen a neutro-

nes, más o menos en la misma cuantía. Son estas fuerzas característicamente intranucleares, que solamente actúan a distancias muy cortas, del orden de 10^{-13} cm. Como consecuencia de su corto alcance, la fuerza atractiva total es proporcional —en primera aproximación— al número de nucleones existentes en el núcleo. Esta es la causa fundamental de que se mantenga constante la energía de enlace por nucleón, en un amplio intervalo de números másicos (fig. 1.1). Además de las fuerzas de corto enlace (atractivas), existen también fuerzas repulsivas, de carácter electrostático (culombianas), que se ejercen entre

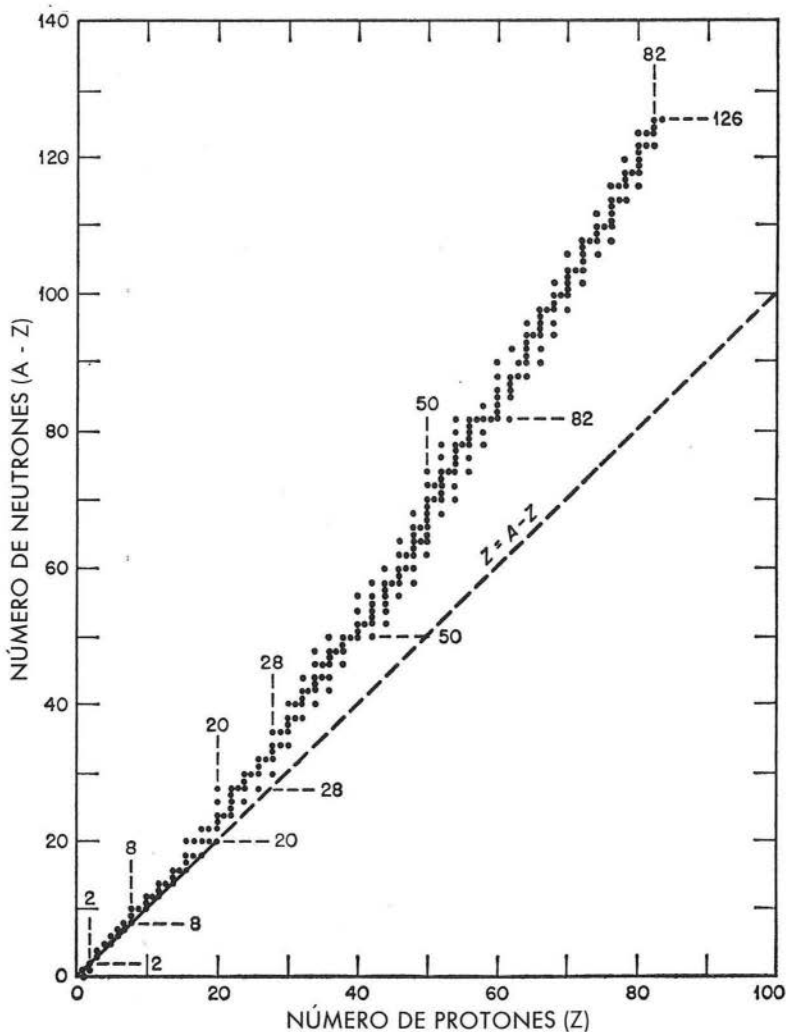


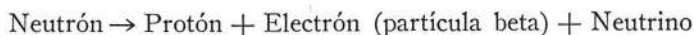
FIG. 1.2. Número de neutrones y protones existentes en los núcleos estables. (Las líneas de trazos cortos indican los números mágicos de neutrones y protones)

los protones cargados positivamente, y que son capaces de actuar a distancias relativamente grandes. La fuerza total de repulsión electrostática entre todos los protones existentes en el núcleo es proporcional al cuadrado del número de éstos, es decir, a Z^2 . Se ejercen entre los nucleones otras fuerzas de carácter repulsivo, pero no tienen mayor importancia en el problema que ahora nos ocupa.

RADIOACTIVIDAD

1.25. Tratándose de núcleos de número atómico —o másico— pequeño, la fuerza repulsiva entre protones es también pequeña. De aquí que, al ser más o menos iguales las fuerzas protón-protón, neutrón-neutrón y protón-neutrón, sean de esperar valores próximos a la unidad para la relación neutrón/protón, como condición de estabilidad. Ahora bien, al ir aumentando el número atómico, se va haciendo cada vez mayor la repulsión electrostática entre protones, que es proporcional a Z^2 . Para mantenerse estables, los núcleos deben, pues, contener una mayor proporción de neutrones, con el fin de que las fuerzas atractivas neutrón-neutrón y neutrón-protón puedan compensar las fuerzas de repulsión entre protones, rápidamente crecientes. Hay un límite, sin embargo, al exceso de neutrones sobre protones que un núcleo puede contener, manteniéndose estable. Como consecuencia de este límite, los elementos de número atómico superior a 84 no poseen isótopos estables; cierto que existen en la naturaleza los elementos comprendidos entre el 84 (polonio) y 92 (uranio), pero se trata de isótopos inestables, que presentan el fenómeno conocido con el nombre de *radioactividad*.

1.26. Los núclidos radioactivos se desintegran espontáneamente con una velocidad determinada, que depende de la naturaleza del núclido. El núcleo inestable emite una partícula (o radiación) característica, transformándose de este modo en un núcleo diferente, que también puede ser —o no— radioactivo. Los núclidos cuya inestabilidad se debe al elevado valor de su número másico, o bien emiten *partículas alfa* cargadas positivamente, que son idénticas a los núcleos de helio y constan de dos protones y dos neutrones, o bien emiten *partículas beta* negativas, idénticas a los electrones ordinarios. El núcleo en sí no contiene electrones, de suerte que, en la desintegración beta, el electrón procede de la conversión espontánea de un neutrón en un protón, según el esquema siguiente:



La partícula supletoria, neutra, de masa prácticamente nula, llamada *neutrino*,* se lleva parte de la energía liberada en la transformación radioactiva.

1.27. Se deduce de las anteriores consideraciones que el núcleo resultante —o hijo— de una desintegración alfa tiene dos protones y dos neutrones menos

* Hablando con rigor, esta partícula es un *antineutrino*, pero la distinción carece de importancia en esta ocasión.