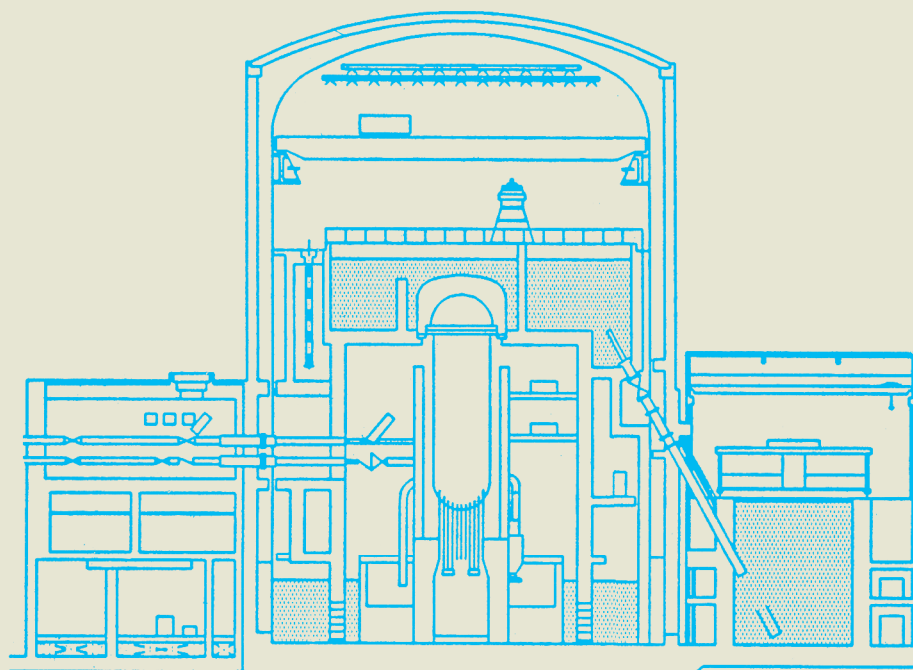


José Ródenas Diago



# PROBLEMAS AMBIENTALES DE LA ENERGÍA NUCLEAR



**IBERDROLA**

EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

José Ródenas Diago

# **PROBLEMAS AMBIENTALES DE LA ENERGIA NUCLEAR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y NUCLEAR

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

Servicio de Publicaciones

SPUPV-94.773

Edita: SERVICIO DE PUBLICACIONES  
Camino de Vera, s/n  
46071 VALENCIA  
Tel.96-387 70 12  
Fax.96-387 79 12

Imprime: REPROVAL, S.L., C° Vera, s/n  
Tel. 96-369 22 72

---

ISBN: 84-7721-294-5  
Depósito Legal: V - 4575 - 1994

*A Marita,  
a Pepe,  
a Carlos.*





*«Una civilización es un legado de creencias, de costumbres y de conocimientos, adquiridos lentamente a través de los siglos, que, a veces, resultan difíciles de justificar mediante la lógica, pero que se justifican por sí mismos, como los caminos, si conducen a alguna parte, puesto que abren al hombre su dimensión interior.»*

(Antoine de Saint-Exupery: **Pilote de Guerre**)



# PRÓLOGO

---

Es una grata tarea y considero una distinción el redactar este prólogo al libro del profesor D. José Ródenas Diago, "Problemas Ambientales de la Energía Nuclear".

Son ya más de dos décadas de colaboración profesional con el profesor Ródenas en el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia. Durante todo ese tiempo nos han interesado a ambos los aspectos ambientales de la Energía Nuclear, algunos de ellos fueron especialmente estudiados por el autor de la obra, constituyendo la base de su magnífica tesis doctoral, la cual aporta nueva metodología para la estimación de dosis al individuo y a la población como consecuencia de la operación de una instalación nuclear.

La prolongada y profunda reflexión del Dr. Ródenas sobre el impacto de la Energía Nuclear en el medio ambiente le avalan para impartir estos temas en el programa de Doctorado del Departamento, cuya docencia incuba sin duda el nacimiento de la presente obra.

En el amplio temario que el autor presenta en su libro, un grupo de temas se dedican a la generación e inventario de radionucleidos en el núcleo del reactor y en su refrigerante, así como a los sistemas de tratamiento de los efluentes radiactivos y a las salvaguardias tecnológicas. De esta forma, el lector queda preparado para comprender y evaluar las posibles descargas al medio.

Otro grupo de temas se dedican con minuciosidad al estudio del comportamiento de los productos radiactivos en el medio y a la estimación de las dosis que los mismos imparten al individuo y a la población, y esto tanto en operación normal como en caso de accidente.

En el último grupo de temas presenta el autor el impacto de otras etapas del ciclo de combustible, tratando de forma específica el transporte de materiales nucleares y la gestión de residuos radiactivos, añadiendo a todo ello el impacto térmico de las plantas nucleares, con especial consideración, en este último tema, a los efectos ecológicos de las descargas térmicas al medio.

Merece reconocimiento el autor por su esfuerzo en reunir en el texto una gran cantidad de datos, a través de gráficos y tablas, lo que añade a su interés didáctico una indudable utilidad como obra de consulta.

Es pues una agradable noticia la aparición de la obra del profesor Ródenas que viene a enriquecer la magra literatura nuclear en nuestra lengua. Sin duda prestará una gran ayuda tanto a la comunidad científica nuclear como a los especialistas e interesados en el candente tema del medio ambiente.

Vicente Serradell García  
Catedrático de Ingeniería Nuclear

# ÍNDICE

---

## Tema 1

### RECAPITULACIÓN SOBRE EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

1.1	Concepto de ciclo de combustible. ....	1
1.2	Etapas del ciclo de combustible. ....	1
1.2.1	Obtención del material combustible. ....	4
1.2.2	Fabricación de elementos combustibles. ....	7
1.2.3	Gestión del combustible en el reactor. ....	9
1.2.4	Reprocesado del combustible gastado. ....	9
1.3	Ejemplos de ciclo de combustible. ....	12
1.4	Impacto ambiental del ciclo de combustible. ....	16
	Bibliografía .....	17

## Tema 2

### INVENTARIO DE PRODUCTOS DE FISIÓN EN EL NÚCLEO DE UN REACTOR

2.1	Introducción. ....	19
2.2	Los productos de fisión. ....	20
2.3	Acumulación de productos de fisión primarios. ....	23
2.3.1	Potencia constante. ....	23
2.3.2	Estados transitorios controlados por desintegración. ....	24
2.3.3	Caso general. ....	25
2.4	Acumulación de productos de fisión en series radiactivas. ....	26
2.5	Acumulación de productos de fisión tras la parada del reactor. ....	28
2.6	Acumulación de productos de fisión indiferenciados. ....	29
	Bibliografía. ....	31

### Tema 3

#### BALANCE DE ACTIVIDAD EN EL REFRIGERANTE DE UN REACTOR

3.1	Introducción. . . . .	33
3.2	Contaminación del refrigerante con productos de fisión. . . . .	33
3.2.1	Contaminación exterior previa de las vainas. . . . .	35
3.2.2	Concentración de productos de fisión en el refrigerante. . . . .	35
3.3	Contaminación del refrigerante por activación. . . . .	37
3.3.1	Agua. . . . .	37
3.3.2	Aire y anhídrido carbónico. . . . .	40
3.3.3	Metales líquidos. . . . .	40
3.4	Activación de impurezas. . . . .	40
3.5	Activación de los productos de corrosión. . . . .	41
3.5.1	Activación de productos de corrosión inertes. . . . .	45
3.5.2	Corrosión de materiales del núcleo. . . . .	47
3.6	Contaminación del refrigerante por átomos de retroceso. . . . .	48
3.7	Variación de la actividad en los refrigerantes. . . . .	50
3.7.1	Refrigeración en circuito abierto. . . . .	51
3.7.2	Refrigeración en circuito cerrado. . . . .	52
3.8	Generación de tritio. . . . .	54
	Bibliografía. . . . .	56

### Tema 4

#### SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

4.1	Introducción. . . . .	59
4.2	Sistemas de purificación del refrigerante primario. . . . .	60
4.3	Residuos radiactivos. . . . .	63
4.3.1	Residuos líquidos. . . . .	63
4.3.2	Residuos gaseosos. . . . .	65
4.4	Sistemas de tratamiento de efluentes líquidos. . . . .	66
4.4.1	Desmineralizadores. . . . .	66
4.4.2	Almacenamiento de retención. . . . .	67
4.4.3	Filtración. . . . .	67
4.4.4	Centrifugación. . . . .	68
4.4.5	Evaporación. . . . .	68
4.4.6	Reciclado del agua. . . . .	70
4.4.7	Desgasificación. . . . .	70
4.4.8	Electrodialisis. . . . .	71
4.4.9	Ósmosis inversa. . . . .	71
4.4.10	Resumen. . . . .	72
4.5	Sistemas de tratamiento de efluentes gaseosos. . . . .	73
4.5.1	Filtración. . . . .	73

4.5.2	Adsorbentes de carbón activado. ....	74
4.5.3	Almacenamientos de retardo. ....	75
4.5.4	Recombinación. ....	75
4.6	Componentes específicos de los residuos. ....	77
4.6.1	Yodo. ....	77
4.6.1.1	Purificadores. ....	78
4.6.1.2	Reactores de plata. ....	78
4.6.1.3	Lechos de carbón. ....	78
4.6.2	Gases nobles. ....	79
4.6.2.1	Retención-Decaimiento. ....	80
4.6.2.2	Adsorción en carbón a baja temperatura. ....	80
4.6.2.3	Destilación criogénica. ....	80
4.6.2.4	Absorción en fluorocarbono. ....	81
4.6.2.5	Membranas de permeabilidad selectiva. ....	81
4.6.2.6	Oclusión en redes cristalinas. ....	82
4.6.2.7	Contención y almacenamiento. ....	82
4.6.3	Tritio. ....	82
4.6.3.1	Reducción de la fuente. ....	83
4.6.3.2	Reciclado. ....	83
4.6.3.3	Recuperación de tritio. ....	84
4.6.4	Rutenio. ....	84
	Bibliografía. ....	85

## Tema 5

### SALVAGUARDIAS TECNOLÓGICAS

5.1	Introducción. ....	87
5.2	Contención. ....	88
5.2.1	Funciones de la contención. ....	88
5.2.2	Criterios de proyecto. ....	89
5.2.3	Sistemas de contención en centrales PWR. ....	95
5.2.4	Sistemas de contención en centrales BWR. ....	97
5.3	Sistema de depuración de la atmósfera del recinto de contención. ....	98
5.3.1	Definición y funciones. ....	98
5.3.2	Criterios de proyecto. ....	99
5.3.3	Depuración por ventilación. ....	100
5.4	Sistema de extracción de calor del recinto de contención. ....	101
5.4.1	Definición y funciones. ....	101
5.4.2	Criterios de proyecto. ....	102
5.4.3	Descripción y componentes. ....	102
5.4.3.1	Subsistema de refrigeración de emergencia de la contención. ....	102
5.4.3.2	Subsistema de aspersión. ....	103



5.5	Sistema de refrigeración de emergencia. . . . .	104
5.5.1	Definición y funciones. . . . .	104
5.5.2	Criterios de proyecto. . . . .	104
5.5.3	Descripción del sistema en un PWR. . . . .	105
5.5.4	Descripción del sistema en centrales con BWR. . . . .	107
5.6	Otros sistemas. . . . .	110
5.6.1	Sistema de control de hidrógeno. . . . .	111
5.6.2	Sistema de agua de alimentación auxiliar en un PWR. . . . .	111
5.6.3	Sistema de refrigeración con núcleo aislado en un BWR. . . . .	111
5.6.4	Sistema de control líquido de reserva en un BWR. . . . .	113
	Bibliografía. . . . .	114

**Tema 6**

**DESCARGAS DE RADIATIVIDAD AL MEDIO**

6.1	El confinamiento de los productos radiactivos. . . . .	115
6.2	Descargas de productos radiactivos durante la operación normal. . . . .	116
6.2.1	Reactores de agua a presión. . . . .	116
6.2.2	Reactores de agua en ebullición. . . . .	121
6.3	Descargas de productos radiactivos en caso de accidente. . . . .	123
6.3.1	Ecuaciones generales. . . . .	124
6.3.2	Accidentes tipo. El término fuente. . . . .	126
6.3.3	La integral de escape. . . . .	127
	Bibliografía. . . . .	129

**Tema 7**

**COMPORTAMIENTO DE LOS PRODUCTOS RADIATIVOS EN EL MEDIO**

7.1	Introducción. . . . .	131
7.2	Dilución de efluentes líquidos en medios acuosos. . . . .	131
7.3	Concentración de radionucleidos en agua. . . . .	134
7.4	Difusión de efluentes gaseosos en la atmósfera. . . . .	134
7.5	Concentración en aire. . . . .	151
7.6	Concentración en el suelo. . . . .	151
	Bibliografía . . . . .	152

**Tema 8**

**CÁLCULO DE DOSIS EN OPERACIÓN NORMAL**

8.1	Introducción. . . . .	155
8.2	Definiciones. . . . .	155
8.3	Dosis interna. . . . .	157
8.4	Dosis externa. . . . .	162

8.5 Ecuación general. ....	166
8.6 Esquema general de cálculo. ....	167
8.7 Dosis a la población. ....	170
Bibliografía. ....	170

**Tema 9**

**CÁLCULO DE DOSIS DEBIDAS A EFLUENTES LÍQUIDOS**

9.1 Introducción. ....	173
9.2 Ingestión de agua potable. ....	176
9.3 Ingestión de alimentos acuáticos. ....	177
9.4 Exposición directa en riberas contaminadas. ....	187
9.5 Ingestión de alimentos vegetales. ....	192
9.6 Ingestión de alimentos de origen animal. ....	196
Bibliografía. ....	198

**Tema 10**

**CÁLCULO DE DOSIS DEBIDAS A EFLUENTES GASEOSOS**

10.1 Introducción. ....	201
10.2 Dosis externa debida a la contaminación del suelo por deposición. ....	202
10.3 Inhalación. ....	205
10.4 Ingestión de alimentos vegetales. ....	206
10.5 Ingestión de productos animales. ....	217
10.6 Dosis externa por exposición a gases nobles. ....	218
Bibliografía. ....	220

**Tema 11**

**CÁLCULO DE DOSIS EN CASO DE ACCIDENTE**

11.1 Introducción. ....	223
11.2 Definiciones. ....	225
11.3 Accidente con perdida de refrigerante en un BWR. ....	226
11.3.1 Liberación de productos radiactivos. ....	226
11.3.2 Difusión atmosférica y conversión de concentraciones en dosis. ....	227
11.3.2.1 Reactores BWR con chimenea. ....	228
11.3.2.2 Reactores BWR sin chimenea. ....	233
11.4 Accidente con perdida de refrigerante en un PWR. ....	236
11.5 Rotura en la línea de vapor de un BWR. ....	236
11.6 Fallo en el tanque de almacenamiento de gases radiactivos en un PWR. ....	238
11.7 Accidente en la manipulación del combustible en reactores BWR y PWR. ....	240
11.8 Calculo de dosis. ....	243
11.8.1 Dosis a todo el cuerpo. ....	243

11.8.2 Cálculo de la dosis al tiroides. ....	245
Bibliografía. ....	245

**Tema 12**

**IMPACTO TÉRMICO SOBRE EL MEDIO**

12.1 Introducción. ....	247
12.2 Descarga de agua caliente. ....	248
12.3 Sistemas de refrigeración. ....	250
12.3.1 Embalses de refrigeración. ....	251
12.3.2 Torres de refrigeración. ....	252
12.4 Utilización del calor residual. ....	256
12.5 Efectos ecológicos de las descargas térmicas. ....	257
12.5.1 Calidad de agua. ....	257
12.5.2 Efectos en la vida acuática. ....	259
12.5.2.1 Bacterias. ....	260
12.5.2.2 Algas y otras plantas acuáticas. ....	260
12.5.2.3 Peces. ....	261
Bibliografía. ....	262

**Tema 13**

**IMPACTO AMBIENTAL DE LAS ETAPAS DEL CICLO DE COMBUSTIBLE**

13.1 Introducción. ....	265
13.2 Minería. ....	266
13.3 Plantas de fabricación de concentrado. ....	271
13.4 Conversión de Uranio. ....	273
13.5 Instalaciones de enriquecimiento. ....	273
13.6 Fabricación de combustible. ....	274
13.7 Plantas de reprocesado. ....	274
13.7.1 Plutonio ....	276
13.7.2 Almacenamiento de residuos ....	276
13.8 Recapitulación. ....	277
Bibliografía ....	277

**Tema 14**

**TRANSPORTE DE MATERIALES NUCLEARES**

14.1 Introducción. ....	279
14.2 Transporte de combustible gastado. ....	281
14.3 Transporte de residuos radiactivos sólidos. ....	284
14.4 Cálculo de dosis debida al transporte. ....	285
14.4.1 Transporte rutinario. ....	286

14.4.2 Accidentes. . . . .	287
14.5 Salvaguardias nucleares. . . . .	288
14.6 Normativa sobre el transporte de materiales radiactivos. . . . .	288
Bibliografía . . . . .	292

**Tema 15**

**GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS**

15.1 Introducción. . . . .	293
15.1.1 Definiciones. . . . .	293
15.1.2 Clasificación. . . . .	294
15.1.3 Fuentes. . . . .	296
15.2 Criterios generales para la gestión de residuos. . . . .	297
15.3 Tratamiento de residuos. . . . .	299
15.3.1 Residuos gaseosos. . . . .	299
15.3.2 Residuos líquidos. . . . .	300
15.3.3 Residuos sólidos. . . . .	301
15.4 Gestión de residuos de alto nivel HLW. . . . .	301
15.4.1 Almacenamiento de HLW en tanques. . . . .	302
15.4.2 Solidificación de residuos. . . . .	303
15.4.3 Gestión definitiva. . . . .	305
15.4.4 Transmutación de residuos de vida larga. . . . .	306
15.5 Almacenamiento y evacuación de residuos. . . . .	308
15.6 Normativa española. . . . .	310
Bibliografía . . . . .	311



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Ciclo de combustible. ....	2
Fig. 1.2	Obtención del material combustible. Primera parte. ....	5
Fig. 1.3	Obtención del material combustible. Segunda parte. ....	6
Fig. 1.4	Fabricación de elementos combustibles metálicos. ....	7
Fig. 1.5	Fabricación de elementos combustibles dispersados. ....	8
Fig. 1.6	Fabricación de elementos combustibles cerámicos. ....	8
Fig. 1.7	Reprocesado del combustible irradiado. ....	10
Fig. 1.8	Fase de descontaminación. ....	11
Fig. 1.9	Fase de separación. ....	11
Fig. 1.10	Ciclo de combustible híbrido uranio-plutonio. ....	12
Fig. 1.11	Ciclo abierto de uranio. ....	14
Fig. 1.12	Ciclo del plutonio. ....	15
Fig. 1.13	Ciclo del torio. ....	16
Fig. 2.1	Rendimiento de los productos de fisión. ....	21
Fig. 2.2	Diagrama de tiempos en un reactor. ....	30
Fig. 3.1	Refrigeración en circuito abierto. ....	51
Fig. 3.2	Refrigeración en circuito cerrado. ....	53
Fig. 4.1	Sistema de purificación del refrigerante en un BWR. ....	61
Fig. 4.2	Sistema de purificación del refrigerante en un PWR. ....	62
Fig. 4.3	Caminos de evacuación de residuos en un PWR. ....	64
Fig. 4.4	Caminos de evacuación de residuos en un BWR. ....	65
Fig. 4.5	Proceso de reciclado de agua. ....	69
Fig. 4.6	Desgasificador. ....	70
Fig. 4.7	Sistema de tratamiento de residuos de lavandería. ....	72
Fig. 4.8	Sistema de tratamiento de efluentes gaseosos en un PWR. ....	76
Fig. 5.1	Aislamiento en las penetraciones de la contención. ....	93
Fig. 5.2	Penetraciones de la barrera de presión. ....	93
Fig. 5.3	Penetraciones del sistema de ventilación. ....	94
Fig. 5.4	Penetraciones de sistemas auxiliares cerrados. ....	94
Fig. 5.5	Edificio de contención de una central PWR de diseño Westinghouse. .	95
Fig. 5.6	Diagrama de una contención para central PWR de diseño KWU. ....	96
Fig. 5.7	Sistema de contención MARK III en una central BWR de diseño General Electric. ....	97



Fig. 5.8	Sistema de depuración de la contención. ....	99
Fig. 5.9	Sistema de depuración por ventilación. ....	101
Fig. 5.10	Unidad de refrigeración de la contención. ....	103
Fig. 5.11	Diagrama de flujo de un sistema redundante de aspersión de la contención. ....	103
Fig. 5.12	Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo en un PWR. ....	106
Fig. 5.13	Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo en un BWR. ....	110
Fig. 5.14	Sistema de refrigeración con núcleo aislado en un BWR. ....	112
Fig. 5.15	Sistema de control líquido de reserva en un BWR. ....	113
Fig. 6.1	Sistema de descarga de residuos radiactivos gaseosos de un PWR. ....	116
Fig. 6.2	Variación de la actividad en la contención. ....	120
Fig. 6.3	Sistema de descarga de residuos radiactivos gaseosos de un BWR. ....	121
Fig. 7.1	Desviación típica vertical de la pluma. ....	140
Fig. 7.2	Efecto del desgaste de la pluma para emisiones a nivel del suelo. ....	145
Fig. 7.3	Efecto del desgaste de la pluma para emisiones a 30 metros de altura. ....	145
Fig. 7.4	Efecto del desgaste de la pluma para emisiones a 60 metros de altura. ....	146
Fig. 7.5	Efecto del desgaste de la pluma para emisiones a 100 metros de altura. ....	146
Fig. 7.6	Deposición relativa para emisiones a nivel del suelo. ....	147
Fig. 7.7	Deposición relativa para emisiones a 30 metros de altura. ....	148
Fig. 7.8	Deposición relativa para emisiones a 60 metros de altura. ....	149
Fig. 7.9	Deposición relativa para emisiones a 100 metros de altura. ....	150
Fig. 8.1	Principales recorridos metabólicos de los radionucleidos en el interior del cuerpo. ....	159
Fig. 8.2	Dosis interna. ....	163
Fig. 8.3	Dosis externa. ....	164
Fig. 8.4	Camino de exposición. ....	168
Fig. 9.1	Camino de exposición debidos a efluentes líquidos. ....	174
Fig. 9.2	Esquema de cálculo para efluentes líquidos. ....	175
Fig. 10.1	Camino de exposición debidos a efluentes gaseosos. ....	203
Fig. 10.2	Esquema de cálculo para efluentes gaseosos. ....	204
Fig. 11.1	Coefficiente de dispersión horizontal. ....	229
Fig. 11.2	Coefficiente de dispersión vertical. ....	229

Fig. 11.3	Factor de difusión atmosférica para emisiones elevadas (0-8 horas después de la emisión). . . . .	231
Fig. 11.4	Factor de difusión atmosférica para emisiones elevadas (8-24 horas después de la emisión). . . . .	231
Fig. 11.5	Factor de difusión atmosférica para emisiones elevadas (1-4 días después de la emisión). . . . .	232
Fig. 11.6	Factor de difusión atmosférica para emisiones elevadas (4-30 días después de la emisión). . . . .	232
Fig. 11.7	Factor de corrección debido a la dispersión producida por la estela de los edificios. . . . .	234
Fig. 11.8	Factor de difusión atmosférica para emisiones a nivel del suelo. . . . .	235
Fig. 11.9	Factor de difusión atmosférica para emisión elevada (30 m) con fumigación. . . . .	237
Fig. 11.10	Factor de difusión atmosférica para emisiones elevadas en condiciones de fumigación. . . . .	242
Fig. 12.1	Flujos de agua de refrigeración en una central nuclear. . . . .	247
Fig. 12.2	Torre hiperbólica de tiro natural. . . . .	253
Fig. 12.3	Torre de tiro inducido y flujo a contracorriente. . . . .	254
Fig. 12.4	Torre de tiro inducido y flujo transversal. . . . .	255
Fig. 12.5	Variación de la población de algas con la temperatura. . . . .	261
Fig. 12.6	Proporciones relativas de algas a lo largo del año. . . . .	261
Fig. 13.1	Serie del Uranio. . . . .	267
Fig. 13.2	Serie del Actinio. . . . .	267
Fig. 13.3	Serie del Torio. . . . .	268
Fig. 13.4	Radón y sus descendientes. . . . .	270
Fig. 14.1	Transporte de materiales en el ciclo de combustible nuclear. . . . .	280
Fig. 14.2	Contenedor para transporte de combustible gastado. . . . .	283





## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Activación de refrigerantes. . . . .	39
Tabla 3.2	Activación de impurezas en refrigerantes. . . . .	42
Tabla 3.3	Liberación máxima de tritio esperada en el refrigerante. . . . .	55
Tabla 7.1	Clases de estabilidad atmosférica. . . . .	139
Tabla 7.2	Valores de los parámetros para el cálculo de $\sigma_{ej}$ . . . . .	140
Tabla 9.1	Factores de conversión a dosis para ingestión. Adulto, (rem/Ci). . . . .	178
Tabla 9.2	Factores de conversión a dosis para ingestión. Joven, (rem/Ci). . . . .	180
Tabla 9.3	Factores de conversión a dosis para ingestión. Niño, (rem/Ci). . . . .	182
Tabla 9.4	Factores de conversión a dosis para ingestión. Lactante, (rem/Ci). . . . .	184
Tabla 9.5	Factores de bioacumulación para alimentos acuáticos, (m <sup>3</sup> /kg). . . . .	186
Tabla 9.6	Factor de anchura de orilla, (m/día). . . . .	188
Tabla 9.7	Factores de conversión para dosis externa, (rem/hora por Ci/m <sup>2</sup> ). . . . .	189
Tabla 9.8	Factores de transferencia. . . . .	194
Tabla 10.1	Factores de conversión a dosis para inhalación. Adulto, (rem/Ci). . . . .	207
Tabla 10.2	Factores de conversión a dosis para inhalación. Joven, (rem/Ci). . . . .	209
Tabla 10.3	Factores de conversión a dosis para inhalación. Niño, (rem/Ci). . . . .	211
Tabla 10.4	Factores de conversión a dosis para inhalación. Lactante, (rem/Ci). . . . .	213
Tabla 10.5	Factores de conversión de dosis para gases nobles. . . . .	219
Tabla 11.1	Clases de estabilidad atmosférica. . . . .	229
Tabla 11.2	Modelo de difusión atmosférica para emisión elevada. . . . .	230
Tabla 11.3	Modelo de difusión atmosférica para emisión a nivel del suelo. . . . .	234
Tabla 11.4	Factores de conversión a dosis para yodo en el tiroides, adultos. . . . .	243
Tabla 12.1	Propiedades del agua en función de la temperatura. . . . .	258
Tabla 13.1	Datos de la serie del uranio. . . . .	269
Tabla 14.1	Logística del ciclo de combustible nuclear. . . . .	279
Tabla 14.2	Actividad y calor en el combustible irradiado. . . . .	282
Tabla 14.3	Niveles máximos permitidos en contenedores de transporte. . . . .	283



# INTRODUCCIÓN

---

El presente texto, "Problemas Ambientales de la Energía Nuclear", es el resultado de impartir durante más de diez años la asignatura del mismo nombre en los Cursos de Doctorado de la Universidad Politécnica de Valencia, cursos que en los primeros años dependían de la E. T. S. de Ingenieros Industriales y más recientemente del Departamento de Ingeniería Química y Nuclear.

Los lectores a los que va dirigido el libro se pueden englobar en un amplio espectro, pues si bien en algunos temas se ha profundizado en los aspectos matemáticos del problema, es posible en general, realizar una lectura conceptual del libro para comprender la problemática ambiental de la Energía Nuclear. Los propios alumnos del citado curso poseían una formación muy diversa y su grado de aproximación a los problemas también era diferente, en función lógicamente de su formación e intereses.

El libro también puede ser utilizado como texto, complementado si es necesario con la bibliografía que se ofrece al final de cada tema, para aquellas asignaturas que aborden problemas nucleares en relación con el Medio Ambiente y la Contaminación, incluidas en los nuevos planes de estudios de la Universidad.

La obra se estructura siguiendo el ciclo de combustible nuclear, para el que se hace una breve recapitulación en el primer tema. El objetivo fundamental del ciclo de combustible es la producción de energía en el reactor, por lo que, teniendo en cuenta además que el número de centrales nucleares de potencia es muy superior al de otras instalaciones del ciclo, se dedica un mayor número de temas a estudiar el impacto ambiental de las centrales nucleares, aunque el impacto unitario de una central en operación normal pueda ser menor que el de otras instalaciones del ciclo.

Con objeto de conocer la cantidad de radionucleidos que pueden pasar del reactor al medio ambiente, se plantea un balance de radiactividad en el refrigerante, considerando las posibles vías de aparición de productos radiactivos en el mismo: contaminación con productos de fisión, o activación del propio refrigerante y de las impurezas que lleva o arrastra por erosión. Previamente se habrán planteado las ecuaciones generales de

acumulación de productos de fisión en el núcleo del reactor, comentando algunos casos particulares. A continuación se describen aquellos dispositivos cuya finalidad es evitar —o disminuir la probabilidad— que los radionucleidos generados alcancen el medio, como son los sistemas de purificación del refrigerante y de tratamiento de efluentes, así como las salvaguardias tecnológicas, consideradas tan sólo desde dicho punto de vista, ya que el interés prioritario del texto no es estrictamente la seguridad.

Las descargas de radiactividad al medio, tanto en operación normal como en caso de accidente, se tratan desde un punto de vista analítico, dedicando especial atención a la integral de escape, para estudiar a continuación el comportamiento de los productos radiactivos en el medio, analizando la dilución de efluentes líquidos en un medio acuoso y la difusión de efluentes gaseosos en la atmósfera, con objeto de poder determinar las concentraciones de radionucleidos en agua, aire y suelo, que constituirán el término fuente para el cálculo de dosis en operación normal.

Como núcleo central del libro se plantea el cálculo de la dosis recibida, individual y colectivamente, por la población que habita en el entorno de una central nuclear, a causa de las descargas rutinarias de la misma. Para ello, se estudian los caminos de exposición a través de los cuales, pueden alcanzar al hombre los radionucleidos liberados por la central, analizando separadamente las dosis externas que pueden recibir por irradiación y las dosis internas causadas por la inhalación o ingestión de dichos radionucleidos. Se establece una ecuación general y un esquema general de cálculo, para desarrollar en los dos temas siguientes un análisis detallado del cálculo de las dosis recibidas a través de los caminos de exposición relativos a los efluentes líquidos y gaseosos respectivamente.

Para el caso de accidente, el análisis se ha limitado a un estudio general del cálculo de dosis en los accidentes base de diseño descritos por las guías reguladoras de la USNRC. Un estudio más completo del problema, incluyendo un análisis probabilístico de seguridad de la planta y un seguimiento de las condiciones del accidente, hubiera alargado excesivamente la obra.

Aunque aparentemente no corresponda al campo nuclear, se ha considerado conveniente dedicar un tema al impacto térmico de las instalaciones nucleares. Finalmente, se estudian los efectos ambientales de las restantes etapas del ciclo de combustible, subrayando los principales problemas, como son la presencia de descendientes del radón en las minas y sobretodo en las plantas de concentrado de uranio, el consumo de energía en las plantas de enriquecimiento, los efluentes de las plantas de reprocesado y el impacto potencial del almacenamiento a largo plazo de los residuos de alta actividad. Asimismo se dedican sendos temas al transporte de materiales nucleares y la gestión de residuos radiactivos, los cuales merecen evidentemente un análisis más profundo que el realizado, pero esto tal vez desviaría la atención del problema ambiental, por lo que en ambos temas se han presentado tan sólo los aspectos más importantes en relación con el medio ambiente.

El autor quiere agradecer el constante ánimo recibido del profesor D. Vicente Serradell García, Catedrático de Ingeniería Nuclear, para culminar la obra. Las preguntas, aclaraciones y sugerencias formuladas por los distintos alumnos que a lo largo de los años han seguido el curso, han realimentado fructíferamente al autor en la redacción y corrección del texto. Reciban todos desde aquí el debido agradecimiento. Asimismo, es de justicia agradecer la colaboración de D<sup>a</sup> M<sup>a</sup> José Ivars en el mecanografiado de los textos iniciales y de D. Antonio Juncos en la parte gráfica. No hubiera sido posible la publicación del libro sin la colaboración económica de IBERDROLA y el autor quiere agradecer las gestiones realizadas por D. Jesús Cruz.

*José Ródenas Diago*  
Profesor Titular  
de Ingeniería Nuclear

Valencia, Diciembre de 1994





---

# Tema 1

---

## RECAPITULACIÓN SOBRE EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

### 1.1 CONCEPTO DE CICLO DE COMBUSTIBLE.

Recibe el nombre de ciclo de combustible nuclear, el conjunto de operaciones a que es sometido el combustible de un reactor nuclear durante las diversas etapas de la trayectoria que sigue desde la mina hasta el propio reactor.

En una central térmica de combustible fósil, éste es transportado desde la mina o pozo a la planta, conducido a los quemadores, y los residuos son dispersados o desechados, con o sin un tratamiento previo. En una planta nuclear de potencia este flujo de operaciones es mucho más complejo, como puede verse en la figura 1.1.

Por otra parte, mientras que en una central térmica clásica, el combustible no deja tras la combustión más que cenizas y humo como residuos, en una central nuclear el combustible gastado que se extrae del reactor tiene un valor residual que puede ser aprovechado mediante su reprocesado y nueva utilización en el mismo u otro reactor.

Esta posibilidad de reutilización del combustible que sale del reactor justifica, junto con la larga cadena de operaciones de que es objeto, el concepto de ciclo de combustible, que es exclusivo de las centrales nucleares, siendo un factor diferencial básico en su economía con respecto a las centrales térmicas convencionales.

### 1.2 ETAPAS DEL CICLO DE COMBUSTIBLE.

Las etapas básicas del ciclo son esencialmente las mismas cualquiera que sea el combustible considerado (uranio, torio, plutonio o una mezcla de ellos). Los detalles de cada etapa dependerán del tipo concreto de reactor o reactores incluido en el ciclo. Evidentemente, también tendrá influencia el combustible utilizado, el refrigerante, el moderador y otros materiales, la energía de los neutrones y en su caso las características reproductoras del reactor.



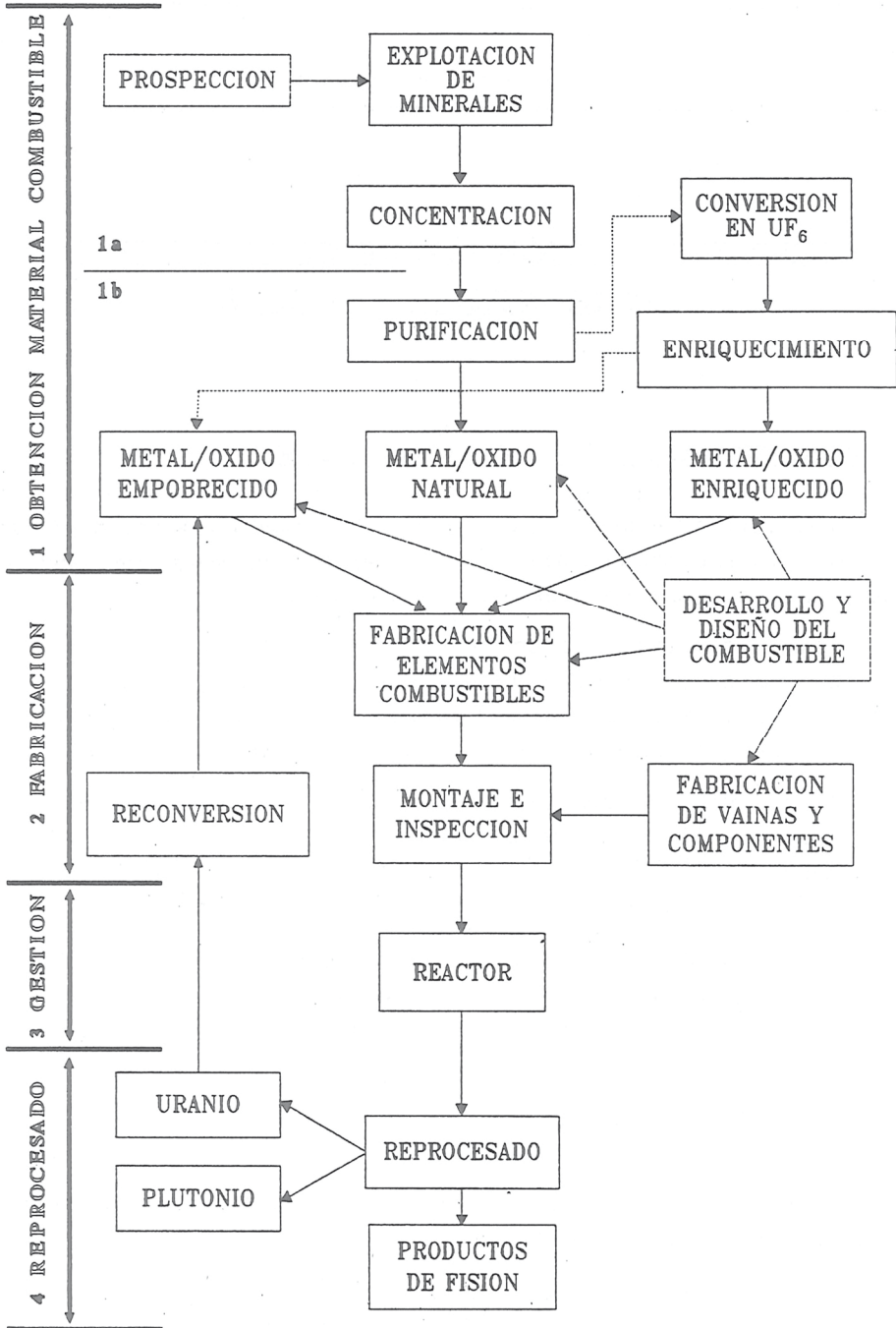


Fig. 1.1 Ciclo de combustible.

La etapa productora de energía se basa en la reacción de fisión, que es inducida mediante bombardeo neutrónico. En cada fisión se liberan unos 200 MeV, en forma de energía cinética de dos núcleos pesados llamados productos de fisión. Asimismo, se emiten varios neutrones, uno de los cuales al menos debe interactuar con otro núcleo fisible para continuar el proceso.

El aspecto singular del ciclo de combustible nuclear proviene del hecho de que no es posible conseguir la "combustión" de todo el material fisible disponible en el núcleo del reactor, debido a que el aumento de los productos de fisión, que absorben neutrones de un modo parásito, hace progresivamente más difícil e ineficiente el mantenimiento de una masa crítica para proseguir el proceso de fisión. Por esto y otras razones, se extrae el combustible cuando sólo se ha consumido alrededor de un 70% de material fisible.

El combustible gastado se almacena un tiempo mínimo de tres meses para permitir la desintegración de parte de los productos radiactivos acumulados, antes de enviarlo a la planta de reprocesado donde se extraerán los productos de fisión indeseados con objeto de recuperar el material fisible remanente que puede ser utilizado de nuevo tras la purificación y elaboración adecuadas. En cualquier caso, las etapas componentes del ciclo de combustible nuclear pueden ser las siguientes:

- Minería.
- Concentración.
- Purificación.
- Conversión.
- Enriquecimiento.
- Elaboración del material combustible.
- Fabricación de elementos combustibles.
- Utilización del combustible (generación de energía).
- Almacenamiento temporal del combustible gastado.
- Reprocesado.
- Purificación del material fisible recuperado.
- Almacenamiento y eliminación de residuos.

Además hay que considerar el transporte de materiales entre las diversas etapas del ciclo, debiendo destacarse en particular el transporte de los elementos combustibles irradiados desde la central hasta la planta de reprocesado.

Las etapas anteriormente enumeradas se pueden agrupar en cuatro, que se describen brevemente en los siguientes apartados:

- 1) Obtención del material combustible.
- 2) Fabricación de los elementos combustibles.
- 3) Gestión del combustible en el reactor.
- 4) Reprocesado del combustible gastado.

### 1.2.1 Obtención del material combustible.

En esta etapa hay dos partes bien diferenciadas. La primera abarca desde la mina hasta la obtención del concentrado (pastel amarillo) y en ella se incluye la explotación de yacimientos, la preconcentración física y la concentración química.

En la segunda parte se procede a la purificación del concentrado obtenido y a la elaboración posterior del producto que llegará a la fábrica de elementos combustibles, incluyendo un proceso de enriquecimiento si es necesario. Sendos esquemas de estas subetapas pueden verse en las figuras 1.2 y 1.3 respectivamente.

Las instalaciones de concentrado suelen estar situadas en las proximidades de los yacimientos. El mineral extraído se somete frecuentemente a una preconcentración física que selecciona el mineral en bruto, eliminando estériles y mejorando el rendimiento del proceso ulterior.

La primera fase de la concentración química consiste en disolver el mineral mediante un ácido o una base. En primer lugar se tritura y pulveriza el mineral para liberarlo de la ganga y facilitar su disolución. Hay que trabajar en medio acuoso para evitar la propagación de polvos. Para la disolución se puede utilizar la lixiviación, ácida o alcalina (en función del contenido en carbonatos del mineral). Tras la lixiviación se separan los estériles por decantación o filtración.

En una segunda fase hay que extraer el uranio de la solución obtenida. Para ello se puede actuar mediante una serie de precipitaciones, aunque es preferible utilizar la fijación por resinas intercambiadoras de iones o la extracción por disolventes orgánicos. La solución obtenida se precipita mediante una base, obteniéndose una mezcla de uranatos que se separan por filtración y secado. El producto resultante es de aspecto pastoso y tiene color amarillo por lo que se denomina pastel amarillo ("yellow cake").

El concentrado en forma de uranatos o de nitrato de uranilo se envía a la planta de refinado, donde tras disolverlo con ácido nítrico es sometido a una purificación, que normalmente se realiza mediante una extracción por solvente y que tiene por objeto obtener una solución con el grado de pureza deseado.

Esta solución se somete a un proceso de elaboración que variará en función de la forma final que se desee obtener para el combustible. Dicha forma suele ser una de las siguientes:

- Lingote metálico, para enviar a la fábrica de elementos combustibles metálicos.
- Polvo de óxido ( $\text{UO}_2$ ), para la fabricación de combustibles cerámicos.
- Tetrafluoruro de uranio ( $\text{F}_4\text{U}$ ), para su conversión en  $\text{F}_6\text{U}$  y posterior utilización del mismo en una planta de separación isotópica.

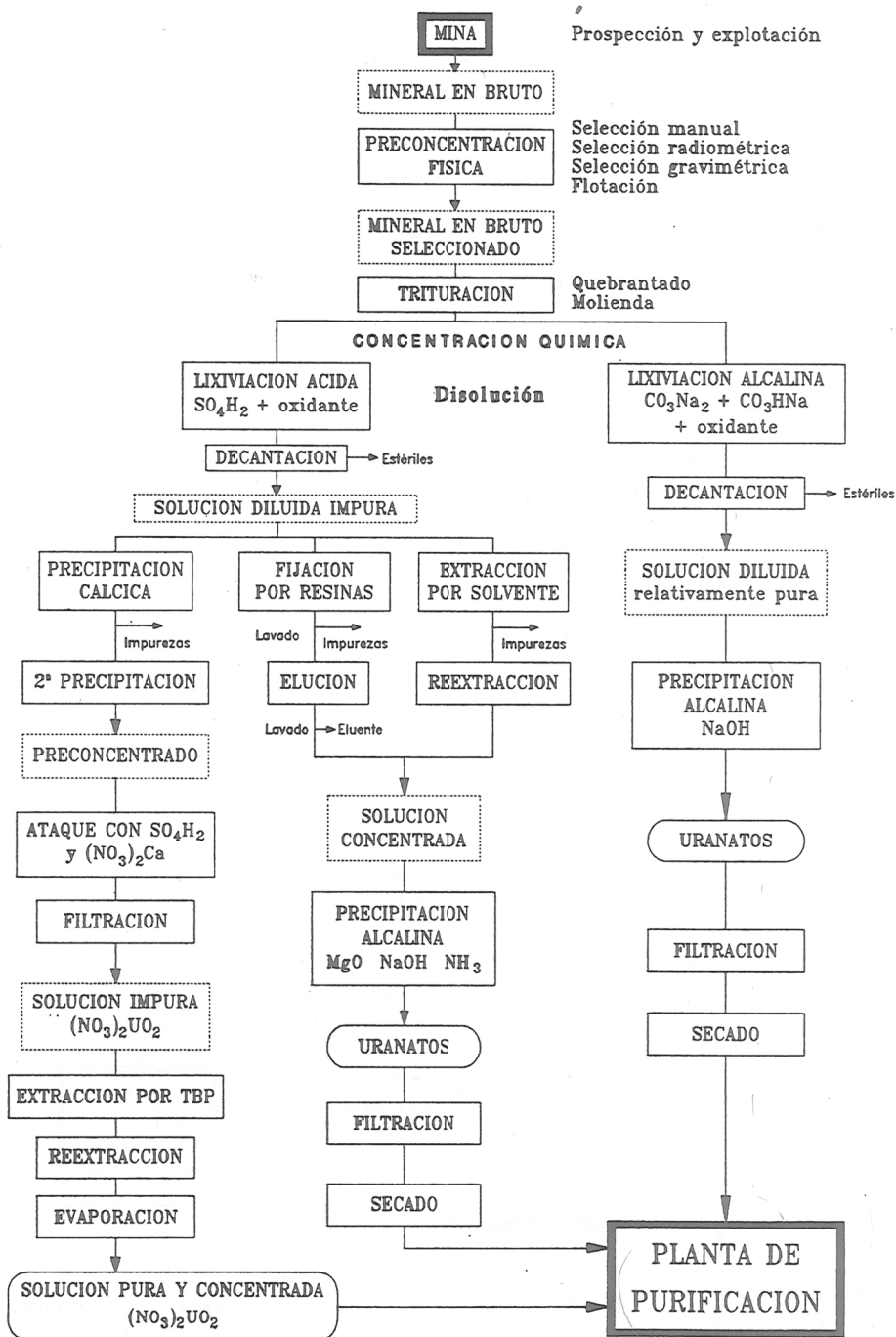


Fig. 1.2 Obtención del material combustible. Primera parte.

**Para seguir leyendo haga click aquí**