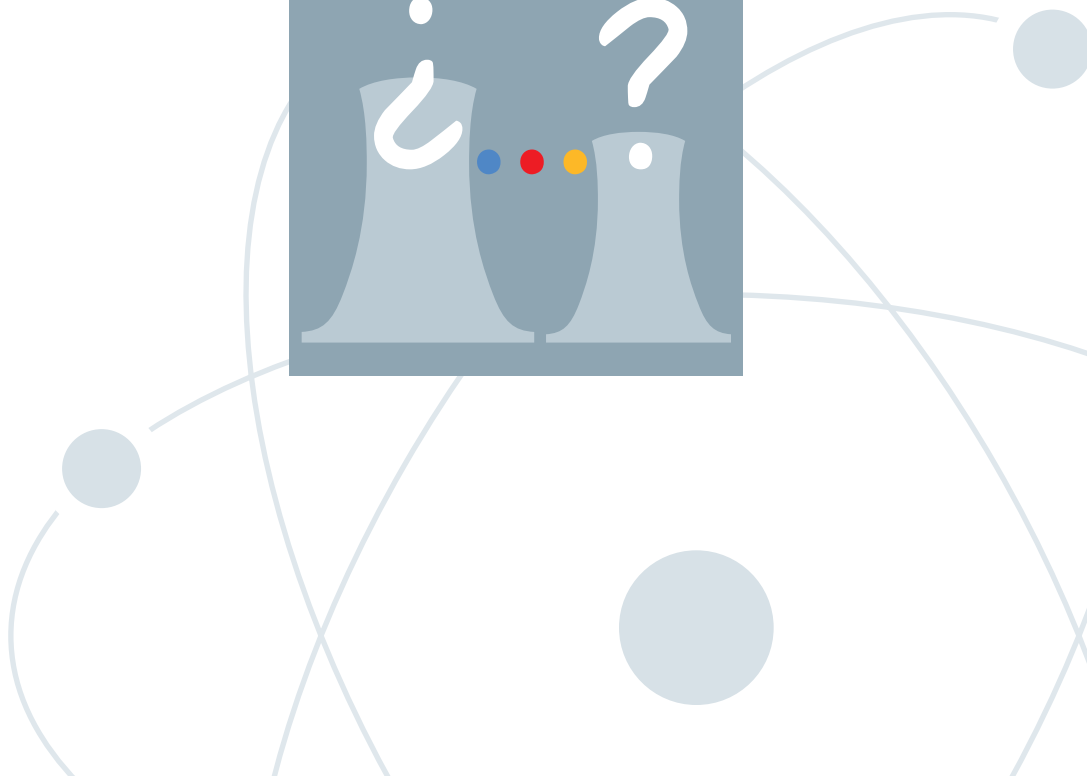
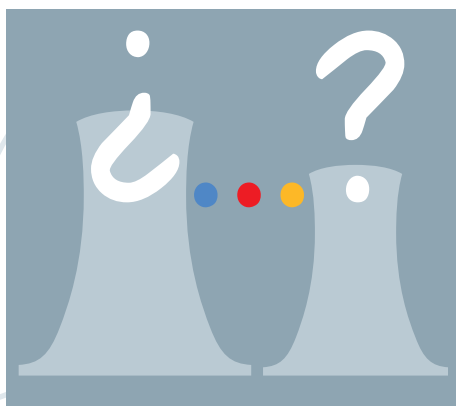




CUESTIONES
SOBRE
LA ENERGÍA



Copyright 2001, Foro de la Industria Nuclear Española
c/ Boix y Morer, 6. 28003 Madrid
www.foronuclear.org
correo@foronuclear.org

AUTORES:

EDICIÓN Enero 2007

Alfonso de la Torre Fernández del Pozo y Luis Palacios Súnico.

EDICIÓN Enero 2001

Miguel Barrachina Gómez, Ángel Entrena Gil, José María García Alonso,
Juan E. Iranzo Martín, Ricardo Manso Casado, Emilio Mínguez Torres,
María Teresa Pascualena Cambra, Andrés de la Poza Galiano, Ignacio Secades Ariz.

EDICIÓN Enero 1993

Miguel Barrachina Gómez, José Ángel Cerrolaza Asenjo, José María García Alonso,
Juan E. Iranzo Martín, Baldomero López Pérez, Emilio Mínguez Torres,
María Teresa Pascualena Cambra, Andrés de la Poza Galiano, Ignacio Secades Ariz.

ILUSTRACIONES: Isabel Arechabala y archivo del Foro Nuclear.

© Las imágenes recogidas en esta publicación han sido facilitadas por Unión Fenosa, Enusa, Enresa, Consejo de Seguridad Nuclear, Initec, Gas Natural, Repsol YPF, Red Eléctrica de España, Unesa, archivos fotográficos de las centrales nucleares españolas, archivo general de Spainfo y archivo del Foro Nuclear.

COORDINACIÓN: Antonio González Jiménez.

DIRECCIÓN DE LA EDICIÓN: Foro de la Industria Nuclear Española.

Depósito Legal: M-52602-2006

Diseño y producción: Spainfo, S.A.

PRESENTACIÓN

*Es un placer para el Foro de la Industria Nuclear Española presentar la nueva edición de la publicación **222 Cuestiones sobre la Energía**. Esta tercera edición se ha hecho realidad manteniendo los objetivos básicos de esta publicación. Fundamentalmente, ofrecer al lector una herramienta de consulta sobre las cuestiones relacionadas con la energía de forma objetiva, amena y manejable.*

La energía es un tema de actualidad y así se refleja a diario en los medios de comunicación, en los libros de texto de los centros de enseñanza, en la agenda de los políticos, etc. A la preocupación por el ahorro energético y una mayor eficiencia en el uso de la energía se ha añadido la inquietud creciente por el medio ambiente y el cambio climático. Todo ello nos conduce a una mayor profundización y conocimiento de las energías existentes y sus características.

Con este libro, el Foro Nuclear pretende facilitar la labor compilatoria de datos y documentación para dar respuesta, al menos, a las 222 preguntas que se plantean a lo largo de los 15 capítulos. La labor de divulgación de nuestra Asociación sobre la energía nuclear se hace extensiva a todas las energías, para así presentar una publicación más completa, que refleja los avances en investigación, las reservas de recursos naturales, la situación económica de las distintas opciones... y todo ello con el máximo rigor para no defraudar a nuestros lectores.

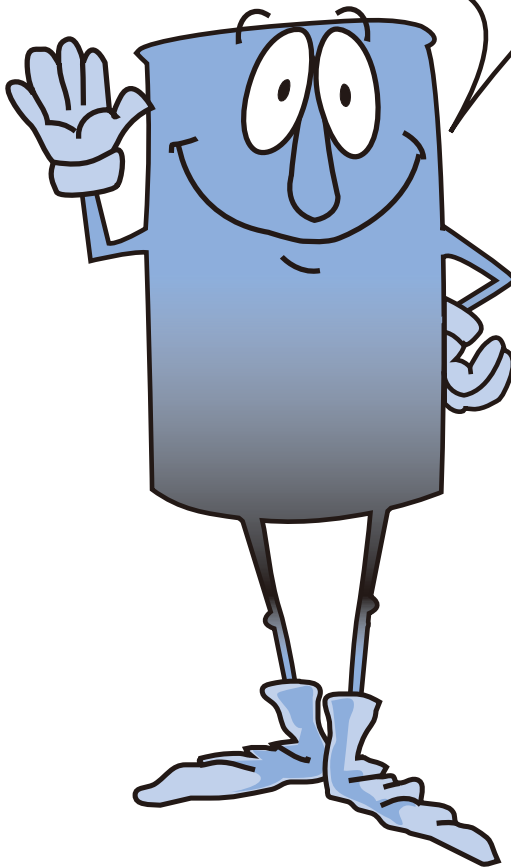
Es necesario agradecer la colaboración y empeño a las personas que han hecho posible esta nueva edición, además de dedicar un especial recuerdo a los autores de las ediciones anteriores y, por supuesto, hacer extensivo nuestro agradecimiento a los fieles lectores que han esperado pacientemente esta revisión, para que continúen considerándola como un libro de referencia sobre la energía.

A todos ellos, así como a nuestros socios y colaboradores, les ofrecemos esta nueva edición con el deseo de que sea considerada como una herramienta divulgativa, útil y amable.

Madrid, enero de 2007

Eduardo González Gómez
Presidente

¡HOLA!
SOY UNA PASTILLA DE URANIO,
MIDO MUY POQUITO
Y SOY CAPAZ DE PRODUCIR MUCHA ELECTRICIDAD.
TE INVITO A HACER UN VIAJE ENERGÉTICO
A LO LARGO DE ESTAS PÁGINAS.



ÍNDICE



CAPÍTULO 1

ENERGÍA Y FUENTES DE ENERGÍA

1	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA?	20
2	••• ¿QUÉ UNIDADES SE USAN PARA MEDIR LA ENERGÍA?	21
3	••• ¿QUÉ ES LA POTENCIA?	23
4	••• ¿DE DÓNDE PROVIENE LA ENERGÍA QUE CONSUMIMOS?	24
5	••• ¿CÓMO SE CLASIFICAN LAS FUENTES DE ENERGÍA?	27
6	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA HIDRÁULICA Y CÓMO SE APROVECHA?	28
7	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA SOLAR Y CÓMO SE APROVECHA?	29
8	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA EÓLICA Y CÓMO SE APROVECHA?	32
9	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA BIOMÁSICA Y CÓMO SE PUEDE APROVECHAR?	34
10	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA GEOTÉRMICA Y CÓMO SE APROVECHA?	36
11	••• ¿QUÉ ES LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ Y CÓMO SE PUEDE APROVECHAR?	37
12	••• ¿QUÉ ES EL CARBÓN Y QUÉ USOS TIENE?	38
13	••• ¿QUÉ ES EL PETRÓLEO Y QUÉ USOS TIENE?	40
14	••• ¿QUÉ ES EL GAS NATURAL Y QUÉ USOS TIENE?	42
15	••• ¿ES LO MISMO ENERGÍA NUCLEAR QUE ENERGÍA ATÓMICA?	43
16	••• ¿CÓMO ESTÁ CONSTITUIDO EL NÚCLEO DE LOS ÁTOMOS?	44
17	••• ¿QUÉ ES LA FISIÓN NUCLEAR?	45
18	••• ¿QUÉ ES LA FUSIÓN NUCLEAR?	46
19	••• ¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO Y CUÁL ES SU PAPEL COMO VECTOR ENERGÉTICO?	47

CAPÍTULO 2

ENERGÍA Y SOCIEDAD

20	••• ¿ES POSIBLE VIVIR SIN UTILIZAR LA ENERGÍA?	52
21	••• ¿QUÉ RELACIÓN EXISTE ENTRE LA EVOLUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y LA EVOLUCIÓN DE LA SOCIEDAD A LO LARGO DE LA HISTORIA?	53
22	••• ¿EXISTE RELACIÓN ENTRE BIENESTAR Y CONSUMO DE ENERGÍA?	54
23	••• ¿QUÉ ENERGÍAS PRIMARIAS SE UTILIZAN EN EL MUNDO?	58
24	••• ¿CUÁL ES LA MEJOR FUENTE ENERGÉTICA?	59
25	••• ¿CÓMO HA EVOLUCIONADO EL ABASTECIMIENTO MUNDIAL DE ENERGÍAS PRIMARIAS?	62

26	••• ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES ÁREAS GEOGRÁFICAS DE CONSUMO Y DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA?	65
27	••• ¿QUÉ ES UNA CRISIS ENERGÉTICA?	69
28	••• ¿CUÁL HA SIDO EL IMPACTO DE LAS CRISIS ENERGÉTICAS SOBRE LE ECONOMÍA MUNDIAL?	70
29	••• ¿HAY ESCASEZ DE ENERGÍA EN EL MUNDO?	71
30	••• ¿POR QUÉ DEBE AHORRARSE ENERGÍA?	73

CAPÍTULO 3

PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA

31	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR RECURSOS Y RESERVAS ENERGÉTICOS?	76
32	••• ¿QUÉ PAPEL JUEGA EL CARBÓN EN EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO MUNDIAL?	78
33	••• ¿DÓNDE SE ENCUENTRAN LAS RESERVAS Y LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN?	79
34	••• ¿SIGUE SIENDO EL PETRÓLEO BÁSICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO MUNDIAL?	80
35	••• ¿QUÉ ES LA OPEP?	81
36	••• ¿DÓNDE SE ENCUENTRAN LAS RESERVAS DE PETRÓLEO Y QUÉ PAÍSES SON LOS PRINCIPALES PRODUCTORES?	83
37	••• ¿QUÉ IMPORTANCIA TIENE EL GAS NATURAL?	84
38	••• ¿CUÁLES SON LAS RESERVAS Y LA PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL?	85
39	••• ¿QUÉ IMPORTANCIA TIENE LA ENERGÍA HIDRÁULICA?	86
40	••• ¿QUIÉNES SON LOS GRANDES PRODUCTORES DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA?	87

CAPÍTULO 4

CONCEPTOS BÁSICOS DE FÍSICA NUCLEAR

41	••• ¿QUÉ ES UN ÁTOMO?	90
42	••• ¿QUÉ SON LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES?	92
43	••• ¿QUÉ SON LOS ISÓTOPOS?	93
44	••• ¿NUCLEIDO E ISÓTOPO SON CONCEPTOS EQUIVALENTES?	94
45	••• ¿QUÉ ES LA RADIOACTIVIDAD?	95
46	••• ¿QUÉ TIPOS HAY DE DESINTEGRACIONES RADIOACTIVAS?	96
47	••• ¿QUÉ LEY RIGE EL PROCESO DE UNA DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA?	98
48	••• ¿QUÉ SON LAS RADIACIONES IONIZANTES?	99
49	••• ¿QUÉ SON LAS REACCIONES NUCLEARES?	100

50	••• ¿CÓMO SE REALIZA UNA REACCIÓN NUCLEAR?	101
51	••• ¿QUÉ ES UNA REACCIÓN DE FISIÓN NUCLEAR EN CADENA?	103
52	••• ¿DÓNDE RESIDE EL INTERÉS PRÁCTICO DE LA FISIÓN?	105
53	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR COMBUSTIBLE NUCLEAR?	105
54	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR MATERIAL FÉRTIL?	107
55	••• ¿DÓNDE RADICA EL INTERÉS PRÁCTICO DE LA FUSIÓN NUCLEAR?	108
56	••• ¿CUÁL ES LA SITUACIÓN ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE FUSIÓN NUCLEAR?	108

CAPÍTULO 5

CONCEPTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

57	••• ¿A QUÉ RADIACIONES IONIZANTES ESTÁ EXPUESTO EL SER HUMANO?	112
58	••• ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES MAGNITUDES QUE SE EMPLEAN EN RADIOLOGÍA?	114
59	••• ENTRE LAS MAGNITUDES RADIOLÓGICAS, ¿CUÁLES SON LAS MÁS SIGNIFICATIVAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?	116
60	••• ¿QUÉ DOSIS RECIBEN NORMALMENTE LAS PERSONAS?	117
61	••• ¿SON PELIGROSAS LAS RADIACIONES IONIZANTES PARA LOS SERES VIVOS?	119
62	••• ¿CUÁLES SON LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES?	120
63	••• ¿CÓMO SE CLASIFICAN LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES?	121
64	••• ¿QUÉ EFECTOS BIOLÓGICOS SE PRODUCEN CON DOSIS ALTAS DE RADIACIÓN?	123
65	••• ¿QUÉ EFECTOS BIOLÓGICOS SE PRODUCEN CON DOSIS BAJAS DE RADIACIÓN?	124
66	••• ¿QUÉ DIFERENCIA EXISTE ENTRE IRRADIACIÓN Y CONTAMINACIÓN RADIATIVA?	126
67	••• ¿QUÉ ES LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y CUÁLES SON SUS OBJETIVOS?	127
68	••• ¿CUÁLES SON LOS ORGANISMOS INTERNACIONALES QUE SE OCUPAN DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?	128
69	••• ¿QUÉ ORGANISMO ESTÁ ENCARGADO EN ESPAÑA DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?	130
70	••• ¿CÓMO PUEDEN PROTEGERSE LAS PERSONAS DE LA IRRADIACIÓN DE UNA FUENTE EXTERNA?	131
71	••• ¿QUÉ MEDIDAS SE USAN PARA LA DESCONTAMINACIÓN RADIATIVA DE PERSONAS?	133
72	••• ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPIOS BÁSICOS EN LOS QUE SE FUNDA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?	134
73	••• ¿CUÁLES SON LAS NORMAS SOBRE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA QUE ESTABLECE LA REGLAMENTACIÓN?	135
74	••• ¿EN QUÉ CONSISTEN LAS MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA QUE SE ADOPTAN EN UNA CENTRAL NUCLEAR Y EN SU ENTORNO?	137

CAPÍTULO 6

APLICACIONES DE LOS ISÓTOPOS EN MEDICINA

75	••• ¿TIENEN APLICACIONES MÉDICAS LAS RADIACIONES IONIZANTES?	140
76	••• ¿QUÉ ES EL RADIODIAGNÓSTICO?	142
77	••• ¿QUÉ ES LA MEDICINA NUCLEAR?	144
78	••• ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES APLICACIONES DIAGNÓSTICAS DE LOS ISÓTOPOS?	146
79	••• ¿CUÁLES SON LOS ISÓTOPOS MÁS UTILIZADOS EN MEDICINA NUCLEAR?	148
80	••• ¿QUÉ ES LA RADIOTERAPIA?	149
81	••• ¿QUÉ ES LA TELETERAPIA?	150
82	••• ¿QUÉ ES LA BRAQUITERAPIA?	152
83	••• ¿QUÉ SE HACE CON LOS RESIDUOS RADIATIVOS QUE SE PRODUCEN EN LAS ACTIVIDADES MÉDICAS CON ISÓTOPOS?	153
84	••• ¿CUÁLES SON LAS ACTUACIONES MÉDICAS EN CASO DE UN ACCIDENTE NUCLEAR?	155

CAPÍTULO 7

APLICACIONES EN INDUSTRIA Y TECNOLOGÍA

85	••• ¿PUEDEN LAS RADIACIONES NUCLEARES ALIVIAR LOS TRABAJOS RUTINARIOS DEL HOMBRE?	158
86	••• ¿POR QUÉ LOS RELOJES ATÓMICOS PERMITEN FECHAR LOS EVENTOS GEOLÓGICOS?	159
87	••• ¿PUEDE UNA PEQUEÑA FUENTE RADIATIVA SUSTITUIR A UN LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO?	162
88	••• ¿LA RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL SE FUNDA EN LOS MISMOS PRINCIPIOS QUE LA RADIOGRAFÍA MÉDICA?	163
89	••• ¿CÓMO AYUDAN LAS RADIACIONES NUCLEARES EN LA RESTAURACIÓN DE OBJETOS ARTÍSTICOS?	164
90	••• ¿CÓMO AYUDAN LAS TÉCNICAS NUCLEARES A DESCUBRIR FALSIFICACIONES ARTÍSTICAS O HISTÓRICAS?	165
91	••• ¿SABES QUE BUENA PARTE DE LOS PRODUCTOS DE USO MÉDICO SE ESTERILIZAN MEDIANTE RADIACIONES NUCLEARES?	167
92	••• ¿ES VERDAD QUE LA MAYORÍA DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS SE OBTIENEN UTILIZANDO RADIACIONES NUCLEARES?	168
93	••• ¿CÓMO CONTRIBUYEN LAS RADIACIONES NUCLEARES A HACER QUE DESAPAREZCA EL HAMBRE EN EL MUNDO?	170
94	••• ¿SE INDUCE RADIATIVIDAD EN LA CONSERVACIÓN DE LOS ALIMENTOS POR IRRADIACIÓN?	172
95	••• ¿POR QUÉ LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS SON TAN ÚTILES EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE LA NATURALEZA?	173

96	••• ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS TRAZADORES RADIACTIVOS?	177
97	••• ¿QUÉ ES EL ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN?	178
98	••• ¿QUÉ SON LOS GENERADORES ISOTÓPICOS DE ELECTRICIDAD?	179
99	••• ¿CUÁNDO SE FORMÓ LA TIERRA?	181
100	••• ¿CÓMO SE HA DETERMINADO LA EDAD DE LA TIERRA?	182
101	••• ¿QUÉ FUNCIÓN CUMPLEN LOS DETECTORES DE RADIACIÓN?	183
102	••• ¿SABES QUE LAS RADIACIONES NUCLEARES SE EMPLEAN EN LA MEJORA DE CULTIVOS AGRÍCOLAS?	185
103	••• ¿SABÍAS QUE LAS RADIACIONES NUCLEARES SE EMPLEAN EN LA ERRADICACIÓN DE PLAGAS AGRÍCOLAS?	186

CAPÍTULO 8

CENTRALES ELÉCTRICAS

104	••• ¿QUÉ ES UNA CENTRAL ELÉCTRICA?	190
105	••• ¿QUÉ ES UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA?	192
106	••• ¿QUÉ ES UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA?	194
107	••• ¿QUÉ ES UNA CENTRAL NUCLEAR?	195
108	••• ¿QUÉ ES UN REACTOR NUCLEAR Y QUÉ ELEMENTOS LO CONSTITUYEN?	196
109	••• ¿QUÉ TIPOS DE REACTORES NUCLEARES SE EMPLEAN EN LAS CENTRALES NUCLEARES?	197
110	••• ¿QUÉ ES UN REACTOR RÁPIDO?	199
111	••• ¿QUÉ TIPO DE REACTORES SE EMPLEAN EN LAS CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS?	200
112	••• ¿QUÉ ES UN REACTOR DE FUSIÓN NUCLEAR?	201
113	••• ¿QUÉ ES UNA CENTRAL SOLAR?	203
114	••• ¿QUÉ ES UNA CENTRAL EÓLICA?	203
115	••• ¿QUÉ VIDA TIENEN LAS CENTRALES ELÉCTRICAS?	204
116	••• ¿QUÉ ES UN REACTOR NUCLEAR ASISTIDO POR ACELERADOR?	205
117	••• ¿CUÁLES SON LOS NUEVOS MODELOS DE REACTORES NUCLEARES?	207

CAPÍTULO 9

EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

118	••• ¿QUÉ ES EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR?	210
119	••• ¿CUÁLES SON LAS RESERVAS DE URANIO EN EL MUNDO?	211
120	••• ¿CUÁL ES LA PRODUCCIÓN DE CONCENTRADOS EN EL MUNDO Y EN ESPAÑA?	213

121	••• ¿CÓMO CUBRE ESPAÑA SUS NECESIDADES DE URANIO?	214
122	••• ¿CÓMO CUBRE ESPAÑA SUS NECESIDADES DE URANIO ENRIQUECIDO?	214
123	••• ¿SE FABRICAN ELEMENTOS COMBUSTIBLES EN ESPAÑA?	215
124	••• ¿SE PUEDEN TRANSPORTAR LIBREMENTE LOS MATERIALES RADIATIVOS?	216
125	••• EL URANIO ENRIQUECIDO EMPLEADO EN CENTRALES NUCLEARES, ¿SIRVE PARA FABRICAR BOMBAS ATÓMICAS?	218
126	••• ¿QUÉ ES EL REPROCESO Y DÓNDE SE REALIZA?	218
127	••• ¿PARA QUÉ PUEDE SERVIR EL PLUTONIO RECUPERADO?	220
128	••• ¿ES IGUAL EL PLUTONIO QUE PUEDE EXTRAERSE DEL COMBUSTIBLE GASTADO PROCEDENTE DE UNA CENTRAL NUCLEAR QUE EL PLUTONIO QUE SE EMPLEA EN BOMBAS ATÓMICAS?	221
129	••• ¿QUÉ POLÍTICA SE SIGUE EN ESPAÑA CON EL COMBUSTIBLE GASTADO?	221

CAPÍTULO 10

EL IMPACTO AMBIENTAL

130	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR MEDIO AMBIENTE?	224
131	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR CONTAMINACIÓN AMBIENTAL?	225
132	••• ¿QUÉ CONTAMINACIÓN PRODUCEN LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS?	227
133	••• ¿QUÉ ES LA LLUVIA ÁCIDA?	228
134	••• ¿QUÉ ES EL PROTOCOLO DE KIOTO Y COMO SE RELACIONA CON EL EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO?	229
135	••• ¿CÓMO AFECTA AL MEDIO AMBIENTE EL CALOR DE REFRIGERACIÓN DE LAS CENTRALES TÉRMICAS?	232
136	••• ¿CUÁLES SON LOS PROBLEMAS AMBIENTALES DE LAS CENTRALES NUCLEARES Y QUÉ MEDIDAS SE TOMAN PARA EVITARLOS?	233
137	••• ¿QUÉ EFECTOS AMBIENTALES PRODUCEN LA MINERÍA Y EL TRANSPORTE DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS?	234
138	••• ¿CUÁLES SON LOS EFECTOS AMBIENTALES DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA?	235
139	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR CONTAMINACIÓN TRANSFRONTERIZA?	236
140	••• ¿CÓMO NOS AFECTAN LAS MEDIDAS AMBIENTALES DE LA UNIÓN EUROPEA?	237

CAPÍTULO 11

GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

141	••• LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS, ¿ES PRIVATIVA DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD?	242
142	••• ¿ES GRAVE EL PROBLEMA QUE PRESENTA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS EN EL MUNDO DE HOY?	244

143	••• ¿QUÉ SON Y DE DÓNDE PROCEDEN LOS RESIDUOS RADIATIVOS?	245
144	••• ¿CÓMO SE CLASIFICAN LOS RESIDUOS RADIATIVOS?	247
145	••• ¿QUÉ RESIDUOS SE GENERAN EN LAS DIVERSAS APLICACIONES DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS?	249
146	••• ¿QUÉ RESIDUOS SE GENERAN TRAS EL “QUEMADO” DEL COMBUSTIBLE DE URANIO EN UN REACTOR NUCLEAR?	250
147	••• ¿QUÉ SE PUEDE HACER CON EL COMBUSTIBLE GASTADO?	253
148	••• SI SE REPROCESA EL COMBUSTIBLE GASTADO, ¿QUÉ RESIDUOS Y OTROS MATERIALES SE GENERAN?	255
149	••• ¿QUÉ ES UN ATC Y QUE RESUELVE EN LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE GASTADO?	257
150	••• ¿CUÁL ES EL POTENCIAL INTERÉS DE LA SEPARACIÓN Y LA TRANSMUTACIÓN DE RADIONUCLEIDOS DE VIDA LARGA?	259
151	••• ¿QUÉ OTROS RESIDUOS RADIATIVOS SE GENERAN EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA?	261
152	••• ¿QUÉ RESIDUOS SE PRODUCEN EN LA MINERÍA DEL URANIO, ASÍ COMO EN LA FABRICACIÓN DE CONCENTRADOS Y DE COMBUSTIBLE NUCLEAR?	262
153	••• ¿QUÉ RESIDUOS SE PRODUCEN EN EL DESMANTELAMIENTO DE LAS CENTRALES NUCLEARES?	264
154	••• ¿CÓMO SE GARANTIZA EL AISLAMIENTO DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS?	266
155	••• ¿CÓMO SE TRANSPORTAN LOS RESIDUOS DE BAJA Y MEDIA ACTIVIDAD?	268
156	••• ¿CÓMO SE ALMACENAN LOS RESIDUOS DE BAJA Y MEDIA ACTIVIDAD?	270
157	••• ¿CUÁL ES LA COBERTURA INTERNACIONAL EN LA CREACIÓN DE NORMAS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS?	272
158	••• ¿QUÉ ES ENRESA Y EN QUÉ CONSISTE EL VI PLAN GENERAL DE RESIDUOS RADIATIVOS?	273

CAPÍTULO 12

EL RIESGO EN LA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

159	••• ¿QUÉ ES Y CÓMO SE DEFINE EL RIESGO?	278
160	••• ¿CÓMO SE ACEPTAN LOS RIESGOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS?	280
161	••• ¿QUÉ RIESGOS EXISTEN EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA?	281
162	••• ¿CUÁL ES EL RIESGO DE LAS CENTRALES TÉRMICAS DE CARBÓN?	282
163	••• ¿CUÁL ES EL RIESGO DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE FUELÓLEO?	283
164	••• ¿CUÁL ES EL RIESGO DE LAS CENTRALES TÉRMICAS DE GAS NATURAL?	284
165	••• ¿CUÁL ES EL RIESGO DE LAS CENTRALES SOLARES?	284
166	••• ¿CUÁL ES EL RIESGO DE LOS PARQUES EÓLICOS?	285
167	••• ¿CUÁL ES EL RIESGO DE LAS CENTRALES NUCLEARES Y COMO SE COMPARA CON LOS DE OTRAS CENTRALES?	286

168	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR SEGURIDAD INTRÍNSECA DE UNA CENTRAL NUCLEAR?	287
169	••• ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA SEGURIDAD NUCLEAR?	288
170	••• ¿CUÁLES SON LAS BARRERAS DE SEGURIDAD QUE IMPIDEN LOS ESCAPES RADIATIVOS DE UN REACTOR NUCLEAR?	290
171	••• ¿QUÉ SON Y PARA QUÉ SIRVEN LAS SALVAGUARDIAS TECNOLÓGICAS?	291
172	••• ¿QUÉ MEDIDAS SE TOMAN PARA GARANTIZAR LA SEGURIDAD DE UNA CENTRAL NUCLEAR?	293
173	••• ¿CÓMO ES LA SEGURIDAD DE UNA CENTRAL NUCLEAR DURANTE SU OPERACIÓN?	295
174	••• ¿QUÉ SE ENTIENDE POR NIVELES ADMINISTRATIVOS DE SEGURIDAD?	296
175	••• ¿PUEDE HACER EXPLOSIÓN UNA CENTRAL NUCLEAR?	297
176	••• ¿QUÉ OCURRIÓ EN LA CENTRAL NUCLEAR DE THREE MILE ISLAND (HARRISBURG)?	298
177	••• ¿QUÉ OCURRIÓ EN CHERNÓBIL?	299
178	••• ¿QUÉ OCURRIÓ EN VANDELLÓS-I?	303
179	••• ¿QUÉ OTROS ACCIDENTES HAN OCURRIDO EN CENTRALES NUCLEARES?	304
180	••• ¿SE PODRÍA PRODUCIR UN ACCIDENTE SEMEJANTE AL DE CHERNÓBIL EN LAS CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS?	305
181	••• ¿SE APLICAN MEDIDAS DE SEGURIDAD A LAS DEMÁS ACTIVIDADES NUCLEARES COMO SON LA MINERÍA, LA FABRICACIÓN DEL COMBUSTIBLE, EL TRANSPORTE DE MATERIALES RADIATIVOS Y EL TRATAMIENTO DE COMBUSTIBLE IRRADIADO?	306
182	••• ¿EXISTE COOPERACIÓN INTERNACIONAL EN LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES NUCLEARES?	308

CAPÍTULO 13

REGLAMENTACIÓN DE LA SEGURIDAD NUCLEAR

183	••• ¿POR QUÉ HAY UNA REGLAMENTACIÓN ESPECÍFICA DE LA SEGURIDAD NUCLEAR?	312
184	••• ¿SON MUY DIFERENTES LAS REGLAMENTACIONES NUCLEARES DE LOS DISTINTOS PAÍSES?	314
185	••• ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES ORGANISMOS INTERNACIONALES QUE FORMULAN RECOMENDACIONES SOBRE SEGURIDAD NUCLEAR Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?	316
186	••• ¿QUÉ PAPEL JUEGA EURATOM EN LA REGLAMENTACIÓN NUCLEAR DE LOS PAÍSES DE LA UNIÓN EUROPEA?	320
187	••• ¿QUÉ ORGANISMO ESTÁ ENCARGADO DE VELAR POR LA SEGURIDAD NUCLEAR Y RADIOLÓGICA EN ESPAÑA?	321
188	••• ¿QUÉ REGLAMENTACIÓN NUCLEAR SE APLICA EN ESPAÑA?	323
189	••• ¿CÓMO ESTÁ ORGANIZADO EL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR PARA DAR CUMPLIMIENTO A SUS FUNCIONES?	325
190	••• ¿QUÉ CAPACITACIÓN SE REQUIERE AL PERSONAL DE OPERACIÓN DE LAS INSTALACIONES NUCLEARES Y RADIATIVAS?	327

191	... ¿CÓMO CONTROLA EL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DE LOS TRABAJADORES PROFESIONALMENTE EXPUESTOS?	328
192	... ¿CÓMO CONTROLA EL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR LA CALIDAD RADIOLÓGICA DEL MEDIO AMBIENTE?	329
193	... ¿QUÉ ES UN PLAN DE EMERGENCIA NUCLEAR?	332
194	... ¿CUÁLES SON LAS MEDIDAS QUE DEBEN TOMARSE, EN UNA INTERVENCIÓN URGENTE, PARA QUE LA POBLACIÓN RECIBA LA MENOR DOSIS POSIBLE (O EVITE LA MAYOR DOSIS PREVENIBLE)?	336
195	... ¿CÓMO INFORMAR A LA POBLACIÓN SOBRE UNA EMERGENCIA NUCLEAR?	337
196	... ¿EN QUÉ CONSISTE LA RESPONSABILIDAD CIVIL NUCLEAR?	340
197	... ¿QUÉ ES EL TRATADO DE NO-PROLIFERACIÓN NUCLEAR?	342

CAPÍTULO 14

ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA

198	... ¿QUÉ SE ENTIENDE POR COSTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA?	346
199	... ¿CÓMO SE CALCULA EL COSTE DE PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA?	347
200	... ¿CÓMO SE CALCULA LA INVERSIÓN DE UNA CENTRAL?	348
201	... ¿CÓMO INFLUYEN LA INVERSIÓN Y EL COMBUSTIBLE SOBRE EL COSTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA?	349
202	... ¿QUÉ ES PRODUCIR ENERGÍA EN “RÉGIMEN DE BASE”?	351
203	... ¿CUÁLES SON LOS COSTES DE LAS TECNOLOGÍAS PRINCIPALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA?	353
204	... ¿QUÉ VENTAJAS SINGULARES APORTA LA ENERGÍA NUCLEAR EN UN MERCADO COMPETITIVO?	355
205	... ¿SON RENTABLES LAS ENERGÍAS RENOVABLES?	356
206	... ¿CUÁL ES EL PAPEL ACTUAL DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN EL MUNDO?	358
207	... ¿CUÁL ES EL PAPEL ACTUAL EN ESPAÑA DE LA ENERGÍA NUCLEAR?	360
208	... ¿QUÉ CONSECUENCIAS SE DERIVARÍAN DEL CIERRE PREMATURO DE LAS CENTRALES NUCLEARES?	362

CAPÍTULO 15

LA ENERGÍA EN LA ECONOMÍA ESPAÑOLA

209	... ¿CUÁL ES EL CONSUMO DE ENERGÍA EN ESPAÑA?	366
210	... ¿CUÁL ES HOY EL BALANCE ENERGÉTICO ESPAÑOL Y CÓMO HA EVOLUCIONADO?	367
211	... ¿POR QUÉ SOMOS TAN DEPENDIENTES Y VULNERABLES EN ENERGÍA?	369

212	••• ¿POR QUÉ EXISTIENDO MUCHO CARBÓN EN EL SUBSUELO ESPAÑOL TENEMOS QUE IMPORTARLO?	370
213	••• ¿CUÁL ES LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN ESPAÑA?	370
214	••• ¿CUÁL ES LA PRODUCCIÓN ESPAÑOLA DE GAS NATURAL?	372
215	••• ¿CUÁL ES EL PARQUE ELÉCTRICO ESPAÑOL?	373
216	••• ¿QUÉ CENTRALES NUCLEARES HAY EN ESPAÑA?	376
217	••• ¿POR QUÉ VARÍA TANTO LA PRODUCCIÓN HIDROELÉCTRICA ANUAL?	378
218	••• ¿POR QUÉ NECESITAMOS PRODUCIR ELECTRICIDAD CON CENTRALES NUCLEARES EN ESPAÑA?	379
219	••• ¿ES MÁS BARATO PRODUCIR ELECTRICIDAD CON CENTRALES NUCLEARES?	382
220	••• ¿CUÁL ES LA PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE NUESTRAS CENTRALES NUCLEARES?	384
221	••• ¿CUÁLES SON LAS BASES DE UNA POLÍTICA ENERGÉTICA Y CUÁL ES EL SENTIDO DE UNA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA EN LA ACTUALIDAD?	386
222	••• ¿EN QUÉ CONSISTE EL PLAN DE FOMENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN ESPAÑA?	388



ENERGÍA Y FUENTES DE ENERGÍA





La energía es indispensable para la vida y la necesitamos consumir continuamente. Gracias a un reactor nuclear de fusión al que llamamos Sol, la vida es posible en el planeta Tierra. Pero existen otras fuentes energéticas, cada una con sus propias características y limitaciones.

Hemos aprendido a utilizar solo unas cuantas y sabemos que lo hacemos de manera imperfecta. Por eso nos esforzamos continuamente en mejorar nuestros conocimientos y nuestras técnicas. Aprenderemos a utilizar las demás.

Todas las energías disponibles van a ser necesarias y cada sociedad deberá con su sabiduría construir y gestionar su cesta energética. Necesitamos asegurar nuestro abastecimiento energético pues, simplemente, es una cuestión de supervivencia.



¿QUÉ ES LA ENERGÍA?

La energía es la capacidad que poseen los cuerpos para poder efectuar un trabajo a causa de su constitución (energía interna), de su posición (energía potencial) o de su movimiento (energía cinética). Es una magnitud homogénea con el trabajo, por lo que se mide en las mismas unidades, es decir en julios en el Sistema Internacional. Según la forma o el sistema físico en que se manifiesta, se consideran diferentes formas de energía: térmica, mecánica, eléctrica, química, electromagnética, nuclear, luminosa, etc.

Aunque la energía puede cambiar de forma en los procesos de conversión energética, la cantidad de energía se mantiene constante conforme con el

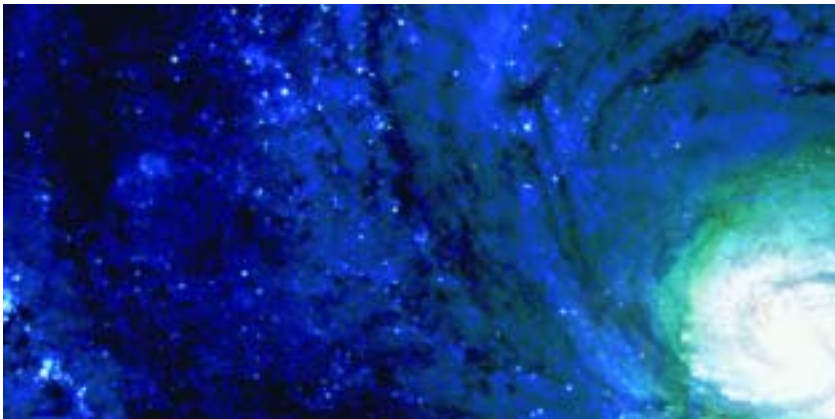
principio de conservación de la energía que establece que la “energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma”. Por consiguiente, la energía total de un sistema aislado se mantiene constante y en el universo no puede existir creación o desaparición de energía, sino transferencia de un sistema a otro o transformación de energía de una forma a otra.

La energía es la consecuencia de la actuación mediante interacciones o intercambios de los cuatro tipos de fuerzas fundamentales de la naturaleza: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.

2

¿QUÉ UNIDADES SE USAN PARA MEDIR LA ENERGÍA?

Si la energía que posee un cuerpo se pone de manifiesto realizando un trabajo, el valor de este trabajo será una medida de la energía que posee. Si por el contrario hemos realizado un trabajo sobre un cuerpo y éste lo ha almacenado en forma de energía, la medida del trabajo reali-



Vista del firmamento. En los astros se liberan cantidades ingentes de energía

zado sobre el cuerpo nos dará el valor de la energía que permanece de forma latente en el cuerpo. Por todo ello la energía liberada o acumulada tendrá las mismas unidades que la magnitud trabajo.

En el Sistema Internacional de unidades (SI) la unidad de trabajo y de energía es el julio (J) definido como el trabajo realizado por la fuerza de 1 newton cuando desplaza su punto de aplicación 1 metro, o lo que lo mismo, elevar una masa de 101 g un metro.

En física nuclear se utiliza como unidad el electronvoltio (eV), definido como la energía que adquiere un electrón al pasar de un punto a otro entre los que hay una diferencia de potencial de 1 voltio.

Su relación con la unidad del Sistema Internacional es:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} \text{ o lo que es lo mismo } 1 \text{ Julio} = 6,2 \times 10^{18} \text{ eV}$$

Para la energía eléctrica se emplea como unidad de producción el kilovatio-hora (kWh), definido como el trabajo realizado durante 1 hora por una máquina que tiene una potencia de 1 kilovatio. Su equivalencia con la unidad del Sistema Internacional es:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J} \text{ ó } 3,6 \text{ millones de julios}$$

o lo que es lo mismo, la energía consumida por una bombilla de 40 vatios encendida 25 horas. En la simbología aceptada para el kilovatio hora se pueden emplear, indistintamente, kW-h o kWh, pero nunca kW/h que no tiene sentido físico alguno.

Para poder evaluar la calidad energética de las distintas fuentes de energía se establecen unas unidades basadas en el poder calorífico de cada una de ellas. Las más utilizadas en economía energética son kcal/kg, tec y tep.

- kcal/kg aplicada a un combustible nos indica el número de kilocalorías que obtendríamos en la combustión de 1 kg de ese combustible.

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \times 10^3 \text{ J}$$

- tec: tonelada equivalente de carbón. Representa la energía liberada por la combustión de 1 tonelada de carbón (hulla).

$$1 \text{ tec} = 29,3 \times 10^9 \text{ J}$$

- tep: tonelada equivalente de petróleo. Equivale a la energía liberada en la combustión de 1 tonelada de crudo de petróleo.

$$1 \text{ tep} = 41,84 \times 10^9 \text{ J}$$

La relación entre estas unidades es

$$1 \text{ tep} = 1,428 \text{ tec}$$

3

¿QUÉ ES LA POTENCIA?

Al trabajo realizado por un sistema en la unidad de tiempo se le llama potencia. Cuando se refiere a un proceso se define como la variación de energía registrada en el tiempo utilizado entre la situación de partida y la final. En consecuencia, la potencia mide la rapidez con que se transforma la energía. Su unidad en el sistema internacional (SI) es el vatio, definido como la potencia de una máquina que realiza el trabajo de 1 julio en el tiempo de 1 segundo. Su símbolo es W. En consecuencia, si elevamos 101 g de masa a la altura de un metro en un segundo, estamos desarrollando la potencia de 1 vatio.

La potencia es por tanto la capacidad de hacer trabajo en el tiempo, mientras la energía es la disponibilidad almacenada para realizar ese trabajo y éste es la medida de lo realmente hecho. Esta diferencia de conceptos es muy importante tanto en la física como en otras disciplinas a las que se puede aplicar.

Con frecuencia se utilizan otros múltiplos de esta unidad.

Son el kilovatio (kW), el megavatio (MW) y el caballo de vapor (CV o HP)

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$$

$$1 \text{ CV o HP} = 735,5 \text{ W}$$

$$1 \text{ MeV} \times \text{s}^{-1} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ W}$$

4

¿DE DÓNDE PROVIENE LA ENERGÍA QUE CONSUMIMOS?

Casi toda la energía de que disponemos proviene del Sol. Él es la causa de los vientos, de la evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, de los saltos de agua. Su calor y su luz son la base de la fotosíntesis en el mundo vegetal con la generación del oxígeno y la absorción del CO_2 , y de otras innumerables reacciones químicas indispensables para la vida de los vegetales y de los animales. Con el paso de los milenios y la concurrencia de situaciones muy específicas, los restos del mundo vegetal y animal enterrados han originado los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas.

Si recordamos el principio de la conservación de la energía, afirmaremos de manera incuestionable que la energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma. Por tanto si necesitamos obtener energía, tendremos que partir de algún cuerpo que la tenga almacenada y pueda experimentar una transformación. A estos cuerpos se les llama fuentes de energía.



El Sol, fuente básica de energía

De forma más amplia llamaremos fuente de energía a todo sistema natural, artificial o yacimiento que puede suministrar energía. Las cantidades disponibles de energía de estas fuentes son lo que se llama recurso energético.

La Tierra posee enormes cantidades de estos recursos. Sin embargo uno de los problemas que tiene planteada la humanidad es la obtención y transformación de los mismos.

Las fuentes energéticas más buscadas son aquellas en las que la energía está muy concentrada (mucho energía por unidad de masa). Es el caso del carbón, petróleo, gas natural, uranio, etc. Por el contrario, tenemos otro tipo de fuentes cuya concentración energética es muy baja y a las que llamamos energías difusas. Estas presentan una gran dificultad para su captación, primero, y para la generación energética de cantidades suficientes de energía, después, por su variabilidad climatológica o por requerir enormes extensiones de terreno. Es el caso de la energía solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, etc.

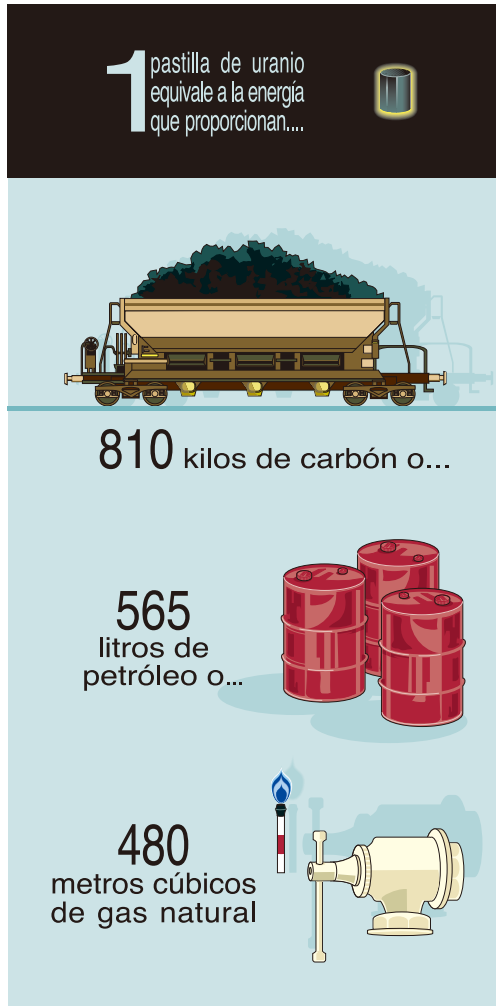
En las primeras hay que tener en cuenta, además del contenido energético, las impurezas, localización del yacimiento, facilidad de explotación, tecnología requerida; razones todas ellas que inciden directamente en el coste de obtención de esa energía y por tanto en la rentabilidad de la explotación.

En el caso de las energías difusas el problema está en lograr una concentración suficiente para su extracción y después adecuar su producción a las necesidades del abastecimiento, resolviendo el almacenamiento de la energía producida, así como el proceso adecuado para su transformación. Estos datos son importantes para hacer el balance económico de cada fuente.

Todas las fuentes de energía son importantes, pero desde el punto de vista de su utilización concreta, las distintas fuentes de energía pueden ser o no ser sustitutivas entre sí.

Por ejemplo, para la producción de energía eléctrica en una central podemos utilizar carbón, petróleo, gas natural o uranio. Sin embargo en un proceso siderúrgico el uranio nunca podría sustituir al carbón, y como carburante los derivados del petróleo (gasolinas, querosenos) no pueden ser sustituidos por carbón, uranio, madera....

Lo decisivo de una fuente energética de cara a su utilización en las economías modernas es su capacidad para garantizar el abastecimiento. Esto impulsa a que sea, finalmente, la complementariedad de cada una de ellas, de acuerdo con sus características, la solución que se demanda para resolver esta exigencia social y económica.



5

¿CÓMO SE CLASIFICAN LAS FUENTES DE ENERGÍA?

Para clasificar las distintas fuentes de energía se pueden utilizar varios criterios:

- a) Según sean o no renovables.
 - b) Según su grado de disponibilidad: convencionales o en desarrollo.
 - c) Según sea la forma de su utilización. Energías primarias o utilizadas directamente y energías secundarias o finales que son aquellas que han sufrido un tipo de transformación anterior a su uso, como la electricidad.
- a) Llamaremos fuentes de energía renovables a aquellas cuyo potencial es inagotable por provenir de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de otros planetas de nuestro sistema solar. Son la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz y la biomasa. Las fuentes de energía no renovables son aquellas que existen en una cantidad limitada en la naturaleza. La demanda mundial de energía en la actualidad se satisface en un 94% con este tipo de fuentes: carbón, petróleo, gas natural y uranio.
- b) Si atendemos al segundo criterio de clasificación, llamaremos fuentes de energía convencionales a aquellas que tienen una participación importante en los balances energéticos de los países industrializados. Es el caso del carbón, petróleo, gas natural, hidráulica y nuclear.

Por el contrario, se llaman fuentes de energía no convencionales, o nuevas fuentes de energía, a las que por estar en una etapa de desarrollo tecnológico en cuanto a su utilización generalizada, no cuentan con participación apreciable en la cobertura de la demanda energética de esos países. Es el caso de la energía solar, eólica, mareomotriz y biomasa.

- c) Según sea su utilización las fuentes de energía las podemos clasificar en primarias y secundarias. Las primarias son las que se obtienen di-

rectamente de la naturaleza, como el carbón, petróleo y gas natural. Las secundarias, llamadas también útiles o finales, se obtienen a partir de las primarias mediante un proceso de transformación por medios técnicos. Es el caso de la electricidad o de los combustibles derivados del petróleo.

6

¿QUÉ ES LA ENERGÍA HIDRÁULICA Y CÓMO SE APROVECHA?

La energía hidráulica es la energía que se obtiene a partir del agua de los ríos. Es una fuente de energía renovable y supone el 7% del consumo mundial de energía primaria.

De forma indirecta tiene al Sol como origen. La radiación solar en forma de calor evapora el agua de los mares formando las nubes, que a su vez se transformarán en lluvia o en nieve, asegurando así la perennidad del ciclo.

Luego, el efecto de la gravedad terrestre permite aprovechar los caudales de agua descendentes gracias a las presas que se construyen para retenerla en embalses o pantanos artificiales. Estos constituyen grandes depósitos energéticos o de abastecimiento.

La mayoría de las presas hidráulicas se destinan a la producción de energía eléctrica utilizando turbinas hidráulicas. Los países con gran potencial hidráulico y que disponen de caudales de ríos constantes y abundantes obtienen la mayor parte de la electricidad en centrales hidráulicas por sus grandes ventajas, entre ellas la de utilizar un recurso natural que solo hay que encauzar y es gratuito. Además puede utilizarse para otros fines, como el abastecimiento humano o el riego. Por otra parte, se trata del único recurso renovable almacenable, por lo que es muy útil para atender inmediatamente puntas de la demanda.



Pero también presenta inconvenientes por la dificultad de hacer predicciones fiables de los caudales de los ríos, puesto que están sometidos a la variabilidad de los ciclos meteorológicos con períodos secos y húmedos y de imposible control. Los emplazamientos hidráulicos suelen estar lejos de las grandes poblaciones, por lo que es necesario transportar la energía eléctrica producida a través de costosas redes de transmisión. Otro aspecto poco favorable es el efecto negativo que puede tener la creación de un embalse sobre el entorno, con problemas de alteración de cauces, erosión, incidencias sobre poblaciones, pérdida de suelos fértiles, etc.

Estos inconvenientes, unidos a las grandes inversiones necesarias en este tipo de centrales, y a la cada vez más difícil localización de emplazamientos son los que impiden una mayor utilización de esta fuente energética. Sin embargo la energía hidráulica sigue siendo la más empleada entre las fuentes de energía renovables para la producción de energía eléctrica. Sirvan como ejemplo la presa de Itaipú, en Brasil, sobre el río Paraná con 14.000 MW de potencia en continua operación y que abastece el 15% de la energía de Brasil y el 95% de Paraguay, y el sistema de las Tres Gargantas, en China, con 18.000 MW instalados.

7

¿QUÉ ES LA ENERGÍA SOLAR Y CÓMO SE APROVECHA?

La energía solar es la que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética procedente del Sol, en donde es generada por un proceso de fusión nuclear.

En el Sol se producen constantemente reacciones nucleares de fusión: los átomos de hidrógeno se fusionan dando lugar a un átomo de helio, liberando una gran cantidad de energía. La pequeña parte que llega a la Tierra, es además parcialmente reflejada hacia el espacio exterior por la presencia de la atmósfera terrestre.

La energía solar llega a la superficie de la Tierra por dos vías diferentes:

- Incidiendo sobre las áreas iluminadas (radiación directa).
- Por reflexión de la radiación solar absorbida por el aire y el polvo atmosférico (radiación difusa).

La primera es aprovechable de forma directa. Los colectores planos y las células fotovoltaicas aprovechan la segunda, en alguna medida.

Las ventajas de la energía solar son:

- Es una fuente energética inagotable a escala humana y no contaminante.
- Mediante tecnologías que logran su concentración, se pueden alcanzar temperaturas de hasta 3.000 °C, que en principio permiten poner en marcha ciclos termodinámicos de alto rendimiento.

Los inconvenientes de esta fuente de energía son:

- No puede ser almacenada, por lo que tiene que ser transformada inmediatamente en otra forma de energía (calor, electricidad, biomasa o bombeo de agua a los embalses).
- Su aprovechamiento exige disponer de sistemas de captación que ocupan grandes superficies de terreno y algunos de sus principales componentes son muy costosos.
- Es discontinua y aleatoria por la variabilidad de la insolación. No garantiza el suministro energético continuo, pero sí puede resultar una importante ayuda para disminuir el empleo de otras energías contaminantes.



Instalación de captación de energía solar mediante paneles solares

Por tanto la energía solar que llega a la Tierra es gratuita, pero su transformación en energía útil es muy costosa y, en muchos casos, está en fase de experimentación.

El aprovechamiento de la energía solar puede hacerse por dos vías: térmica y fotovoltaica.

A) Vía térmica: transforma la energía proveniente del Sol en energía calorífica. Esta transformación puede darse a baja, media y alta temperatura.

La transformación a baja temperatura se emplea, generalmente, para calefacción doméstica, climatización de locales, calentamiento de agua en hospitales, piscinas.... Se utilizan unos colectores planos que alojan un circuito con un fluido que absorbe la radiación solar y lo transmite en forma de calor al sistema de calefacción. Estos sistemas aprovechan la energía solar a temperaturas que oscilan entre 35 °C y 90 °C, siendo actualmente la principal aplicación de la energía solar térmica en España.

En las instalaciones que trabajan a media temperatura, entre 90 °C y 200 °C, utilizan un conjunto de colectores de concentración de distintas formas:

- a) Cilíndrico-parabólica: recogen la energía solar y la transmiten a un fluido (aceite térmico) en forma de calor.
- b) Heliostatos: formados generalmente por espejos orientables de forma que la radiación incidente sea reflejada en un punto fijo. Las aplicaciones de este tipo de instalaciones son fundamentalmente industriales.

Las instalaciones a alta temperatura son las centrales termoeléctricas con temperaturas superiores a 400 °C. Están formadas por una amplia superficie de heliostatos sostenidos por soportes que reflejan la radiación solar y la concentran en un pequeño punto receptor. Este receptor transmite la radiación solar en forma de calor a un fluido (agua, aire, metales líquidos) que circula por un circuito primario. En un generador de vapor se transmite esa energía a un segundo circuito, produciendo el vapor de agua capaz de accionar un grupo turbina-alternador productor de la energía eléctrica. El rendimiento de estas instalaciones es aproximadamente del 20%.

B) Conversión fotovoltaica: los sistemas solares fotovoltaicos están formados por un conjunto de células solares o fotovoltaicas dispuestas en paneles que transforman directamente la energía solar en energía eléctrica.

La luz solar transporta la energía en forma de un flujo de fotones. Cuando estos fotones inciden en determinado tipo de materiales y bajo ciertas condiciones, provocan una corriente eléctrica. Es lo que se conoce como efecto fotovoltaico.

Las células solares o fotovoltaicas son pequeños elementos fabricados con un elemento cristalino semiconductor dopado, silicio-germanio (Si-Ge). Al incidir sobre ellas, los fotones producen un movimiento de electrones en el interior de la célula y aparece entre sus extremos una diferencia de potencial que los convierte en un pequeño generador eléctrico. El coste actual de estas células es muy elevado, su rendimiento es bajo (10-15%) y su fabricación muy contaminante.

El desarrollo de estos sistemas está ligado a la técnica de los satélites artificiales. En una primera etapa, debido a la fiabilidad de su funcionamiento, su reducido peso y sus escasas necesidades de mantenimiento, estos sistemas fueron utilizados para cubrir las necesidades energéticas de los satélites.

El desarrollo tecnológico se empeña en mejorar el rendimiento de estos sistemas y reducir su coste hasta hacerlos económicamente viables.

8

¿QUÉ ES LA ENERGÍA EÓLICA Y CÓMO SE APROVECHA?

La energía eólica es la energía producida por el viento. Fue una de las primeras fuentes de energía utilizadas por el hombre. Los barcos de vela y los molinos de viento son las primeras manifestaciones del aprovechamiento energético de la energía eólica. En la actualidad existen sistemas para aprovechar la energía cinética del viento y transformarla, posteriormente, en energía eléctrica mediante los aerogeneradores.

Esta fuente de energía presenta las ventajas y los inconvenientes de la energía solar: es inagotable, limpia, no contaminante, y, una vez hecha la instalación para su captación, gratuita. Pero al mismo tiempo es dispersa, intermitente y se presenta de forma irregular en cuanto a su intensidad.

Las principales aplicaciones de la energía eólica en aquellos lugares a los que llega el viento de forma regular y con gran intensidad son:

- 1) Aerobombas. Para elevar el agua se usan ruedas de seis a quince álabes, que pueden bombear de quinientos a seiscientos litros por hora, cantidad suficiente para cubrir las necesidades de pequeñas explotaciones agrícolas.
- 2) Producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores. Para ello se instala una torre en cuya parte superior existe un rotor con múltiples palas que se orientan en la dirección del viento. Estos rotores accionan sobre un generador que permite obtener energía eléctrica.
 - a) Aerogeneradores aislados: se instalan en zonas aisladas en las que no se dispone de energía eléctrica. Pueden obtenerse potencias de diez a cien kW.
 - b) Plantas eólicas: están formadas por un cierto número de aerogeneradores, habiéndose alcanzado ya potencias unitarias cercanas a 2 MW.

En la actualidad, para lograr un mayor aprovechamiento de la energía eólica, se están desarrollando modelos de equipos encaminados a la producción de energía eléctrica con un menor tamaño, una mayor duración



y un mantenimiento más sencillo y barato, procurando mitigar el impacto ambiental producido por los aerogeneradores.

España es hoy la segunda potencia mundial, tras Alemania, en capacidad instalada, con cerca de 10.000 MW. Sin embargo, los aerogeneradores sólo logran operar entre un 20% y un 30% de las horas del año y sin coincidir generalmente con las horas de máxima demanda.

9

¿QUÉ ES LA ENERGÍA BIOMÁSICA Y CÓMO SE PUEDE APROVECHAR?

Es la energía que se puede obtener de los compuestos orgánicos formados en procesos naturales. Es lo que comúnmente se denomina biomasa.

La energía de la biomasa se puede conseguir fundamentalmente:

- Estableciendo determinados cultivos vegetales que puedan transformarse posteriormente en energía (biomasa cosechable).
- Aprovechando residuos forestales, agrícolas y domésticos, transformándolos en combustible (biomasa residual).
- Transformando química o biológicamente ciertas especies vegetales para convertirlas también en combustible (metanol y etanol).

La principal aplicación de la biomasa cosechable es la producción de calor en un proceso de combustión. Para este fin se suelen utilizar plantas de tipo herbáceo y leñoso, obtenidas en ecosistemas naturales, o en cultivos destinados a este fin (agroenergética). En la actualidad se trabaja en este tipo de cultivos, pudiendo ser en el futuro la biomasa cosechable la fuente más importante de biomasa para fines energéticos. Sin embargo la baja capacidad calorífica significa dedicar amplios terrenos a esos cultivos, lo que podría entrar en conflicto con los usos agrícolas. Se valora por la OCDE que para abastecer hasta un 15% de la demanda de combustible del transporte habría que dedicar un 20% de la superficie actual al cultivo de plantas productoras de etanol.

La biomasa residual también ofrece en principio grandes perspectivas en cuanto a su aprovechamiento energético. En este grupo se incluyen los residuos forestales, agrícolas y ganaderos, así como los producidos en los núcleos urbanos (residuos sólidos y aguas residuales principalmente). Estas perspectivas quedan limitadas debido a la contaminación que se produce al eliminar estos residuos y que en ocasiones no compensa los beneficios de la energía que se puede generar, por lo que este tipo de biomasa se utiliza sobre todo en instalaciones que aprovechan sus propios residuos, como en granjas, depuradoras urbanas, o industrias forestales, lugares en los que, además de obtener energía, se ahorran los costes de eliminación de residuos.

Otro gran apartado de recursos energéticos obtenidos de la biomasa lo constituyen los biocombustibles líquidos obtenidos a partir de los aceites vegetales, destinados a sustituir al gasóleo en los motores diésel, o el bioetanol, obtenido por fermentación de la biomasa dirigido a los motores que utilizan la gasolina como combustible. Estos biocarburantes pueden ser utilizados solos o mezclados en los motores de combustión interna pudiendo llegar a ser un puente de transición entre una época dominada por los combustibles de origen fósil y otra potencialmente abierta a la utilización de la biomasa.



La masa vegetal, una fuente de energía biomásica

¿QUÉ ES LA ENERGÍA GEOTÉRMICA Y CÓMO SE APROVECHA?

Podemos considerarla como la energía que encierra la Tierra en forma de calor, y que ha sido producida fundamentalmente en la desintegración de las sustancias radiactivas de su núcleo. Este calor tiende a difundirse en el interior hasta escapar por la superficie de la corteza terrestre. Esta energía sería suficiente para cubrir las necesidades mundiales si pudiera aprovecharse, pero la energía geotérmica es una energía difusa y de difícil aprovechamiento.

La temperatura se distribuye de forma irregular según las zonas de la corteza terrestre. Las bolsas de magma que proceden de las zonas más profundas se desplazan hacia zonas de menor presión. A su contacto las rocas se funden y desprenden grandes cantidades de gases que tienden a salir por las grietas y las fisuras de la corteza, dando lugar a fenómenos de vulcanismo, como son las erupciones volcánicas, salidas de gases a altas temperaturas (fumarolas y solfataras), salida de agua hirviendo y vapor (géiseres) y salidas de agua caliente (fuentes termales), aunque sólo algunas de estas son aprovechables.

La energía geotérmica ha sido utilizada por el hombre desde los tiempos más remotos. En la actualidad se intenta buscar la forma de aprovechar esta inmensa cantidad de energía que encierra la Tierra en forma de calor y que salvo casos aislados queda desaprovechada o perdida.

En las zonas que podríamos llamar privilegiadas (Islandia o partes de Italia), el aprovechamiento de la energía geotérmica se puede realizar a varias temperaturas.

- **Baja temperatura:** se aprovecha directamente el calor que emerge a menos de 100 °C en múltiples aplicaciones: calefacción, agua caliente doméstica y sanitaria, piscinas, invernaderos, secaderos, etc. Esta utilización presenta un inconveniente importante, y es que, debido al bajo nivel térmico del fluido, tiene que ser utilizado en aplicaciones directas

del calor, por lo que el centro de consumo debe estar cerca del yacimiento.

- Media y alta temperatura: para extraer la energía almacenada en la litosfera necesitamos la presencia de un fluido geotérmico intermedio (amoníaco o freón) que actúe como un vehículo transportador de la energía. El fluido geotérmico, una vez alcanzada la superficie, debe someterse a una serie de transformaciones para su utilización. Los fluidos geotérmicos con una temperatura superior a 150 °C se emplean para la producción directa de electricidad, mediante distintos tipos de ciclos. Si la temperatura está comprendida entre 100 y 150 °C, la utilización de esta energía es en procesos industriales.

En la actualidad, las líneas de investigación van encaminadas a realizar proyectos de transformación de energía geotérmica a baja temperatura, con inversiones menores y sondeos menos profundos, siendo menores los riesgos geológicos y los problemas de explotación y de montaje empresarial.



¿QUÉ ES LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ Y CÓMO SE PUEDE APROVECHAR?

La energía mareomotriz es la energía desarrollada por las aguas del mar cuando están en movimiento.

Las mareas son el resultado de la atracción gravitatoria ejercida por el Sol y la Luna sobre nuestro planeta. En algunos lugares el desnivel de las mareas alcanza con frecuencia varios metros entre la marea baja y la marea alta (bajamar y pleamar). Su utilización industrial sólo es posible en aquellas zonas costeras que reúnan determinadas condiciones topográficas y marítimas en las cuales el valor de amplitud del desnivel de las mareas sea comparable a una instalación hidroeléctrica de escasa altura de caída de agua, pero de considerable masa de ésta.

En algunos casos particulares en que la marea penetra por un paso estrecho, es posible mediante diques dejar entrar en él la marea ascendente y

hacer pasar el agua a través de turbinas cuando la marea se retira. Este es el principio de las centrales mareomotrices.

La energía de las olas es mucho más difícil de dominar y hasta el presente no se ha desarrollado la tecnología adecuada.

12

¿QUÉ ES EL CARBÓN Y QUÉ USOS TIENE?

El carbón es un combustible fósil, resultado final de una serie de transformaciones sobre restos vegetales acumulados en lugares pantanosos, lagunas y deltas fluviales, principalmente durante el período carbonífero de la Era primaria.

Por acciones químicas diversas y variaciones de presión y temperatura a lo largo de grandes intervalos de tiempo estos vegetales se transforman en carbón en un proceso llamado carbonización. De forma resumida se puede decir que tras la fase de depósito de los vegetales comienza la acción de las bacterias anaerobias (sobre la celulosa y la lignina fundamen-



Transporte de carbón a la salida de una mina

talmente). Los cambios que dan lugar a la transformación de madera en carbón son de dos tipos: químicos y estructurales. En los químicos se va desprendiendo hidrógeno y oxígeno a medida que la proporción de carbono aumenta. En algunos casos (como en la antracita) llega a constituir casi la totalidad del producto resultante.

Existen también cambios estructurales. La estructura fibrosa de la madera se transforma en estructura microcristalina distinta para cada variedad de carbón, y su color cambia de pardo a negro.

Existen cuatro tipos de carbones diferentes, debido a las distintas clases de vegetal del que proceden y sobre todo a la duración y condiciones (presión y temperatura del proceso de carbonización). Estos son:

- Antracita: es un carbón duro, totalmente carbonizado. Muy compacto y brillante. Con brillo nacarado y color negro.
- Hulla: es un carbón duro, totalmente carbonizado. Color negro lustroso. Brillo nacarado a bandas brillantes y mates.
- Lignito: negruzco. Es un carbón blando perteneciente (como la turba) a épocas posteriores al carbonífero, por lo que no ha sufrido el proceso de carbonización completo. Tiene aspecto de madera quemada y brillo a trozos.
- Turba: es el más reciente de los carbones. Es blando, de color marrón, mate, ligero de peso y en él se observan todavía restos de plantas.

La potencia calorífica de estos carbones varía de 2.000 a 7.000 kcal/kg, desde la antracita y hulla hasta lignito y turba. Asimismo, su humedad oscila del 3% hasta el 40% y las sustancias volátiles pueden ir desde el 8% hasta el 50%. Como principal impureza tenemos el azufre (S) y el nitrógeno (N), que al quemarse el carbón se liberan en forma de SO_2 y NO_x para unirse posteriormente al vapor de agua y producir las lluvias ácidas. Además está el CO_2 , penalizado por el protocolo de Kioto. En la actualidad hay importantes investigaciones para el secuestro del CO_2 emitido mediante su bombeo a formaciones geológicas y la aplicación de sistemas de filtrado de los gases antes citados.

Las aplicaciones más importantes del carbón son:

- Como combustible doméstico e industrial.
- Como reductor en la siderurgia.
- Como combustible en las centrales térmicas.

La antracita se utiliza fundamentalmente como combustible doméstico e industrial. La destilación seca de la hulla da lugar a cuatro fracciones: amoníaco, alquitrán, gas natural y coque. Este último (duro, resistente y poroso) se utiliza en la metalurgia del hierro y del acero (siderurgia). El lignito se emplea fundamentalmente en las centrales térmicas para obtener de él energía eléctrica. La turba se utiliza como combustible doméstico.

13

¿QUÉ ES EL PETRÓLEO Y QUÉ USOS TIENE?

El petróleo es un aceite mineral de color muy oscuro o negro, menos denso que el agua y de un olor acre característico. Está formado por una mezcla de hidrocarburos acompañados de azufre, oxígeno y nitrógeno en cantidades variables. El petróleo se encuentra sólo en las rocas sedimentarias.

El petróleo se origina a partir de una materia prima formada fundamentalmente por restos de organismos vivos acuáticos, vegetales y animales



Campo con pozos de petróleo

que vivían en los mares, las lagunas, las desembocaduras de los ríos y en las cercanías del mar. Estos restos fueron atacados en los fondos fangosos por bacterias anaerobias que consumieron su oxígeno dejando únicamente moléculas de carbono e hidrógeno llamadas hidrocarburos.

La presión ejercida por la enorme masa de sedimentos provoca la expulsión del líquido que se encuentra entre las capas de la roca sedimentaria. Este líquido, el petróleo, migra siguiendo la pendiente a decenas de kilómetros hasta que encuentre una roca porosa e impermeable cuyos huecos rellena. Esta roca es la llamada roca almacén.

El crudo del petróleo es una mezcla de hidrocarburos desde el más sencillo (CH_4 , metano), hasta especies complejas con 40 átomos de carbono. El petróleo, tal como mana del pozo, tiene muy pocas aplicaciones. Para obtener los diversos derivados es necesario someterlo a un proceso de refinación, cuya operación principal es la destilación fraccionada. En ella obtenemos, a distintas temperaturas, toda una gama de productos comerciales a partir del petróleo bruto. Sustancias gaseosas tales como metano, etano, propano y butano; líquidas como las gasolinas, el queroseno y el fuelóleo; sólidas como las parafinas y los alquitranes, se obtienen a distintas temperaturas en este proceso.

Los campos petrolíferos se encuentran normalmente muy lejos de los lugares de consumo. El transporte terrestre de los crudos se realiza, normalmente, a través de oleoductos que van del pozo a la refinería o al puerto de expedición más próximo. El transporte marítimo a larga distancia lo cubren los buques cisternas o petroleros.

Los principales usos del petróleo son:

- Como combustible doméstico e industrial.
- Como carburante y lubricante.
- Como materia prima básica en la industria petroquímica.



Para satisfacer las necesidades del mercado ha sido necesario desarrollar técnicas de transformación que, modificando la estructura de los productos obtenidos en la destilación fraccionada, permitan obtener las sustancias que la sociedad demanda. Entre esas técnicas, las más importantes son el craqueo y la polimerización.

En la operación de craqueo lo que se logra es la ruptura de una molécula pesada con muchos átomos de C (fuelóleo, por ejemplo), originando varias moléculas ligeras (gasolinas y gases, por ejemplo).

La polimerización es la unión de varias moléculas de un compuesto simple llamado monómero (p. ej. etileno), para formar una molécula más compleja llamada polímero (p. ej. polietileno). Este proceso es de gran importancia en la industria petroquímica.

Una de las aplicaciones más importantes del petróleo es su utilización como materia prima en toda la industria petroquímica. El 60% de los productos químicos que se encuentran en el mercado y el 80% del sector orgánico proceden de la petroquímica. Abonos, plásticos, anticongelantes, detergentes, cauchos sintéticos, colorantes, explosivos, fibras plastificantes, disolventes... son productos obtenidos a partir del petróleo.

Por todo ello, podemos afirmar que el petróleo juega un importante papel, no sólo en el campo de los suministros energéticos, sino también en el de la industria química.

14

¿QUÉ ES EL GAS NATURAL Y QUÉ USOS TIENE?

El gas natural es una mezcla de gases entre los que se encuentra en mayor proporción el metano. La proporción en la que se encuentra este compuesto es del 75% al 95% del volumen total de la mezcla. El resto de los componentes son etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, helio y argón.

El desarrollo del empleo del gas natural se ha realizado con posterioridad al uso del petróleo. El gas natural que aparecía en casi todos los yacimientos petrolíferos se quemaba como un residuo más. A pesar de su enorme poder calorífico no se podía aprovechar, por los grandes problemas que planteaban su almacenamiento y transporte.

La necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía, la puesta a punto de las técnicas de licuefacción de gas y procedimientos de soldadura de tuberías para resistir grandes presiones, han hecho posible la utilización de todos estos recursos energéticos. Hoy Europa es abastecida por una red de gasoductos que recorren miles de kilómetros y están en proyecto otros nuevos con Asia y Argelia.

El gas natural se utiliza:

- a) Como combustible doméstico e industrial: tiene un gran poder calorífico. Su combustión es regulable y produce escasa contaminación. Incluso la producción de CO_2 es poco mayor de la mitad de la producida por los restantes combustibles fósiles.
- b) Como materia prima en la industria petroquímica para la obtención de amoníaco, metanol, etileno, butadieno y propileno.

15

¿ES LO MISMO ENERGÍA NUCLEAR QUE ENERGÍA ATÓMICA?

Los términos energía atómica y energía nuclear son sinónimos y definen el mismo concepto. La razón de esta doble denominación es de origen histórico. Existen unos países a los que podemos llamar “pioneros” en las investigaciones relacionadas con la energía emitida por los cuerpos radiactivos y otros a los que podemos llamar “usuarios” de dicha energía. Entre los primeros podemos incluir a Francia y al Reino Unido, países en los que Becquerel, los esposos Curie, Rutherford y sus colaboradores hablaban en sus comunicaciones de energía atómica y lo que estudiaban eran “las grandes cantidades de energía almacenadas en los átomos radiactivos”. En el segundo grupo (en el que podemos incluir a

España) el término nuclear es el que se empezó a utilizar con rigor y precisión.

Existe un intento de generalizar el uso del término nuclear en todos los países. Sin embargo es difícil que se deje de hablar de energía atómica por la gran cantidad de organismos oficiales y de normas que llevan de forma implícita este término.

16

¿CÓMO ESTÁ CONSTITUIDO EL NÚCLEO DE LOS ÁTOMOS?

El núcleo de los átomos fue descubierto en 1911 por Rutherford a partir del análisis de partículas α emitidas por los átomos. Es a partir de 1932, con el descubrimiento del neutrón por Chadwick y con las reacciones llevadas a cabo por los esposos Joliot-Curie, cuando el núcleo empieza a tener verdadera importancia.

El núcleo tiene dimensiones muy reducidas. Ocupa la parte central del átomo; en él reside toda la carga positiva y casi la totalidad de la masa atómica. Está formado fundamentalmente por protones y neutrones. Los protones tienen una carga positiva cuantitativamente igual a la del electrón ($1,602 \times 10^{-19}$ culombios). Los neutrones son eléctricamente neutros.



Algunos de los grandes científicos a quienes debemos la física actual

A las partículas del núcleo se les llama nucleones. Las fuerzas que mantienen unidas las partículas del núcleo entre sí, venciendo, incluso, las de repulsión electrostática entre los protones, son unas fuerzas de naturaleza desconocida y corto alcance que sólo aparecen en el interior de los núcleos y que se llaman fuerzas nucleares.

A la energía acumulada por estas fuerzas nucleares se la llama energía de enlace o de ligadura y se calcula mediante la relación de Einstein $E = mc^2$.

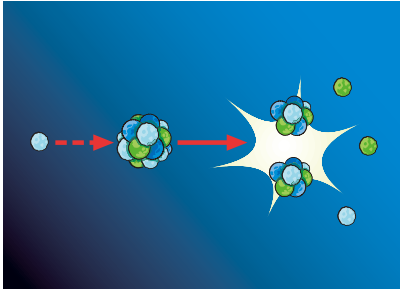
Al determinar la masa del núcleo observamos que es inferior a la suma de la masa de los componentes. La diferencia entre ambas se llama defecto másico (Δm) y la energía de enlace será $E = \Delta m \cdot c^2$.

Una parte de la masa del núcleo se ha transformado en energía de enlace para mantener unidas las partículas del núcleo. Esta energía es la que se libera en una reacción nuclear. Dividiendo la energía de enlace o de ligadura por el número de componentes del núcleo, se obtiene la energía media por nucleón, valor que nos indica la estabilidad del núcleo. Si la energía media de enlace tiene un valor alto, será un núcleo estable. Si su valor es pequeño, será inestable y tenderá a emitir alguno de sus componentes para convertirse en otra forma más estable. En este caso el núcleo es radiactivo.

17

¿QUÉ ES LA FISIÓN NUCLEAR?

La fisión nuclear es una reacción en la cual un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, con gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neutrones. Éstos, a su vez, pueden ocasionar más fisiones al interactuar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones y así sucesivamente. Este efecto multiplicador se conoce con el nombre de reacción en cadena. En una pequeña fracción de segundo, el número de núcleos que se han fisionado libera una energía un millón de veces mayor que la obtenida al quemar un bloque de carbón o explotar un bloque de dina-



Esquema de la fisión del núcleo de un átomo de uranio

mita de la misma masa. Debido a la rapidez a la que tiene lugar una reacción nuclear, la energía se desprende mucho más rápidamente que en una reacción química. Este es el principio en el que está basada la bomba atómica. Las condiciones bajo las que se llegó a su descubrimiento y construcción forman parte de la historia de la humanidad y son conocidas por todos.

Si por el contrario se logra que sólo uno de los neutrones liberados produzca una fisión posterior, el número de fisiones que tienen lugar por segundo es constante y la reacción está controlada. Este es el principio del funcionamiento en el que están basados los reactores nucleares, que son fuentes controlables de energía nuclear de fisión.

18

¿QUÉ ES LA FUSIÓN NUCLEAR?

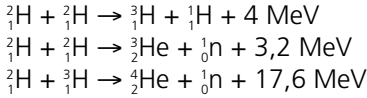
Recibe el nombre de fusión nuclear la reacción en la que dos núcleos muy ligeros se unen para formar un núcleo estable más pesado, con una masa ligeramente inferior a la suma de las masas de los núcleos iniciales. Este defecto de masa da lugar a un gran desprendimiento de energía. La energía producida por el Sol tiene este origen.

Para que tenga lugar la fusión, los núcleos cargados positivamente deben aproximarse venciendo las fuerzas electrostáticas de repulsión. En la Tierra, donde no se puede alcanzar la gran presión que existe en el interior del Sol, la energía necesaria para que los núcleos que reaccionan venzan las interacciones se puede suministrar en forma de energía térmica o utilizando un acelerador de partículas.

La solución más viable es la fusión térmica. Estas reacciones de fusión térmica, llamadas reacciones termonucleares, se producen en los reacto-

res de fusión y fundamentalmente con los isótopos de hidrógeno (protio: ${}^1_1\text{H}$, deuterio: ${}^2_1\text{H}$, y tritio: ${}^3_1\text{H}$).

Entre las posibles reacciones nucleares de fusión están:



El aprovechamiento por el hombre de la energía de fusión pasa por la investigación y el desarrollo de sistemas tecnológicos que cumplan dos requisitos fundamentales: calentar y confinar. Calentar para conseguir un gas sobrecalentado (plasma) en donde los electrones salgan de sus órbitas y donde los núcleos puedan ser controlados por un campo magnético; y confinar, para mantener la materia en estado de plasma o gas ionizado, encerrada en la cavidad del reactor el tiempo suficiente para que pueda reaccionar.

Este tipo de reacciones son muy atractivas como fuente de energía ya que el deuterio no es radiactivo y se encuentra de forma natural y prácticamente ilimitada en la naturaleza. El tritio no se presenta de forma natural y además es radiactivo. Sin embargo las investigaciones están básicamente centradas en las reacciones deuterio-tritio, debido a que liberan una mayor energía y la temperatura a la que tiene lugar la fusión es considerablemente menor que en las otras.

19

¿QUÉ ES EL HIDRÓGENO Y CUÁL ES SU PAPEL COMO VECTOR ENERGÉTICO?

El hidrógeno es el elemento químico más ligero y abundante en el universo. En nuestro planeta apenas se encuentra en estado libre (200 Mt). Aunque su producción es un proceso fundamentalmente endotérmico, es decir, siempre gastaremos mas energía en producirlo que el que obtendremos en su utilización, la consideración del proceso económico y de gestión global de esta fuente energética en las esperadas condiciones

futuras de la demanda energética puede aportar un resultado final que la convierta en competitiva. Esto quiere decir que o bien su producción debe ser fácil y barata o el coste y la oportunidad de su sustitución justifican su uso.

El hidrógeno destaca como combustible por el carácter limpio de su energética reacción de oxidación para formar agua (242 kJ/mol) y porque ésta es casi tres veces más energética por unidad de masa que la reacción de oxidación de los hidrocarburos y resto de combustibles fósiles.

Esta nueva fuente energética adquiere valor económico y competitividad al ser una alternativa del petróleo y del gas, sobre todo en el transporte, y al incorporarse al "mix" energético. El carácter finito de los combustibles fósiles, que en el caso del petróleo y del gas tienen fecha actual de agotamiento en el presente siglo, unido a la preocupación de estar concluyendo la fase de explotación fácil y de bajo coste del petróleo, inciden en la creciente importancia del hidrógeno como energía sustitutiva de estos. Además, hay que añadir que es una fuente energética limpia de gases del efecto invernadero en su uso, aunque no sea así en todos los métodos de producción.

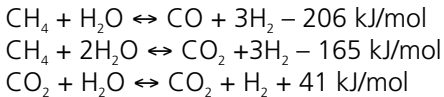
En la actualidad, el hidrógeno se obtiene principalmente a partir de los combustibles fósiles, generándose gases de efecto invernadero. Sin embargo es posible su producción limpia mediante electrólisis del agua o disociando directamente esta molécula con temperaturas del orden de los 2.500 °C. Este último procedimiento es objeto de investigación y está registrando avances muy importantes mediante los nuevos ciclos termoquímicos con catalizadores avanzados y membranas, logrando reducir dicha temperatura al entorno de los 900 °C o incluso 550 °C.

En la producción del calor necesario para alcanzar las citadas temperaturas y sin verter gases del efecto invernadero, se abren paso los reactores nucleares de alta temperatura (HTGR), para el rango de los 950 °C y se añaden los reproductores rápidos para los valores de 550 °C. En la actualidad hay funcionando prototipos de reactores HTGR conectados a una planta de generación de hidrógeno con un plan de pruebas enfocado a disponer de un modelo comercial en la próxima década. También existe una oportunidad para la energía solar mediante su concentración.

Téngase en cuenta que una tonelada de hidrógeno producida por el sistema actual de reformado (descomposición) de la molécula del gas natural

(metano) genera 7,75 t de CO₂, provenientes un 70% de la reacción química y un 30% de quemar parte de este metano para alcanzar la temperatura de reacción. Si en su lugar se aportase directamente vapor de agua calentado por un reactor nuclear entonces el CO₂ sería un 30% menos.

Las reacciones de reformado del metano se realizan con un catalizador de níquel y a temperatura entre 550 y 900 °C:



La electrolisis mediante energía eléctrica ahora supone el 4% del total producido, con la restricción de su elevado coste. Se abre la posibilidad de producir esta electricidad con energías renovables pero hay que considerar los condicionantes que conlleva por su irregularidad, la ocupación del terreno necesaria y los costes finales de transporte, ya sea del hidrógeno o de la energía eléctrica.

La utilización del hidrógeno se hace en motores mediante su oxidación directa con el oxígeno, o últimamente mediante la tecnología de las celdas de combustible ahora en pleno desarrollo. Se trata de una "máquina" inversa a una batería, de forma que aportando por sus dos electrodos: ánodo y cátodo, hidrógeno y oxígeno, respectivamente, genera electricidad y agua, con rendimientos del 70%.

De confirmarse la viabilidad económica y de gestión del uso del hidrógeno, estaríamos en el umbral de una nueva era energética con un nuevo e importante "vector energético" capaz de crear una economía alternativa a la actual basada en el petróleo. Hablamos de vector pues es una energía que requiere ser elaborada y como tal es un producto y a la vez un servicio como la electricidad. El hidrógeno se utiliza hoy en la industria química y en la aeroespacial. También existen, ya, prototipos de vehículos impulsados por este gas circulando en algunos países.

Solo para poder mantener la demanda de la industria petroquímica, se estima que deberá duplicarse su producción a final de la presente década y cuadruplicarse en 20 años. Si a esto se le añade su posible incorporación a la economía del transporte (25% del consumo de energía primaria mundial) y a la de generación de calor (40%) y electricidad, entonces las necesidades de este combustible salen de escala.

La producción mundial de H_2 supera los 50 Mt, cantidad suficiente para abastecer 150 millones de coches con celdas de combustible o alimentar energéticamente a cerca de 30 millones de hogares. Esta producción de H_2 (2% de la demanda de energía primaria mundial) necesitaría la producción de 104 reactores nucleares dedicados.

Hablar del hidrógeno como fuente energética sostenible del futuro significa, finalmente, hablar de energía nuclear y de renovables para su producción.



CAPÍTULO
2

ENERGÍA
Y
SOCIEDAD





La quinta parte de la humanidad consume las cuatro quintas partes de la energía demandada y el resto de la humanidad anhela su modelo de vida. En los próximos 20 años la población humana crecerá un 25% y la energía consumida lo hará en un 50%. Los combustibles fósiles y el uranio continuarán resolviendo el consumo, con la cada vez más importante presencia de las energías renovables.

La gestión que se haga del presente debe evitar poner en riesgo las necesidades de las generaciones futuras.

20

¿ES POSIBLE VIVIR SIN UTILIZAR LA ENERGÍA?

La necesidad de la energía es tan evidente que referirse a ello constituye un tópico. Antes de nada porque la propia vida biológica está basada en procesos de oxidación que consumen energía y generan residuos. Además, porque como es de todos conocido, la actividad humana requiere en cada segundo, de forma indispensable y generalizada, emplearla: en la agricultura (abonos, secaderos, plaguicidas, cosechadoras, ...), en todos los procesos industriales (calor, frío, metalurgia, alimentación, vestido, ...), en los transportes (terrestres, marítimos y aéreos), en los hogares, en las actividades recreativas, en los servicios (financieros, información, comunicación..), etc.

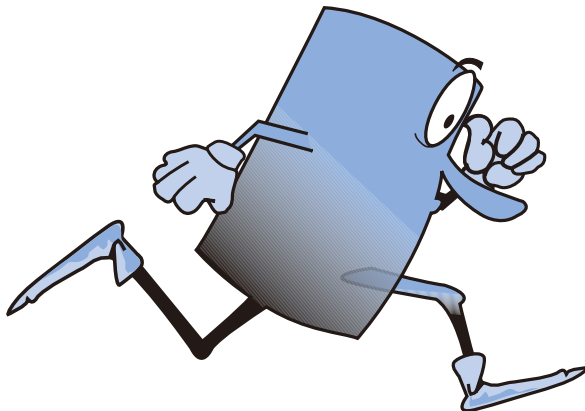
En definitiva, las sociedades actuales, sea cual sea su nivel de bienestar, no pueden funcionar ni sobrevivir sin un abastecimiento adecuado y regular de energía, de forma que todo el proceso del ciclo energético (obtención, procesado y suministro de energía allí donde y cuando se requiera y al menor coste posible) constituye un apartado significativo del sistema económico

mundial. También, por todo ello y por su carácter de “insustituible”, la energía es un factor geopolítico y geoeconómico que protagoniza las relaciones y la convivencia humana, con sus conflictos y sus logros.

21

¿QUÉ RELACIÓN EXISTE ENTRE LA EVOLUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y LA EVOLUCIÓN DE LA SOCIEDAD A LO LARGO DE LA HISTORIA?

La enorme importancia de la energía en el mundo actual no debe inducirnos a pensar que su uso sea algo exclusivo de las economías modernas, pues desde tiempos remotos el hombre ha sabido utilizar, además de su propio esfuerzo físico, el de algunos animales domésticos para obtener energía mecánica; a ello unirá después las fuerzas del viento y de las corrientes de agua. El ciclo energético antiguo se completa con el calor obtenido por la combustión de la madera, usado en los hogares y



en incipientes actividades fabriles para fundir metales y obtener todo tipo de herramientas y utensilios.

Con el inicio de la Revolución Industrial en Inglaterra durante el siglo XVIII, extendida a Europa y Norteamérica a lo largo de la primera mitad del XIX, se producen transformaciones cualitativas y cuantitativas importantes, al desaparecer paulatinamente en las sociedades más avanzadas el modelo de consumo y producción hasta entonces imperante, sustituyéndose las fuentes empleadas durante milenios por otras nuevas cuyo uso, además, se incrementa exponencialmente. La coincidencia no es casual, pues el gran salto que supone este proceso de transformaciones económicas, sociales y técnicas, conocido con el ya acuñado término de Revolución Industrial, habría sido imposible sin la sustitución de las energías hasta entonces disponibles (biomasa con la madera, animales de carga: caballos y bueyes, algunos molinos hidráulicos, etc...) por el carbón y, después, por los hidrocarburos y la hidroelectricidad, añadiendo hoy el gas y la nuclear, todas las cuales constituyen uno de los pilares básicos de la economía de las sociedades modernas.

Para que lo anterior sucediese fue preciso un espectacular desarrollo tecnológico, desde la máquina de vapor al reactor nuclear, pasando por el motor de explosión y el generador eléctrico que, en definitiva, hizo operativa la aplicación de esas fuentes energéticas a múltiples usos.

Si la historia humana evoluciona por las transformaciones sociales, técnicas y económicas, las energéticas se insertan dentro de estos dos últimos ámbitos.

22

¿EXISTE RELACIÓN ENTRE BIENESTAR Y CONSUMO DE ENERGÍA?

El consumo de energía por habitante constituye uno de los indicadores más fiables del grado de desarrollo económico y de bienestar de una sociedad determinada. En este sentido, la demanda energética se asocia de forma generalizada con el Producto Nacional Bruto (PNB) de un país, con su capacidad industrial y con el nivel de vida alcanzado por sus habitantes.

Mientras Europa, incluyendo la antigua URSS, con una población de 870 millones de habitantes, necesita 2.913 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) anuales, África, con parecida población, 831 millones, sólo requiere 300 Mtep. Otro dato completa lo dicho si nos referimos a la totalidad del planeta, donde la tercera parte de los 6.500 millones de habitantes que lo habitan no tiene acceso al suministro eléctrico ni a sistemas garantizados de suministro de agua potable.

Lo anterior no es más que un ejemplo de una realidad que establece la correlación entre el consumo de energía y el nivel de vida. El 20% de la población que consume el 80% de la energía es el que disfruta de un nivel de vida y bienestar más avanzado. Este desequilibrio induce a las sociedades en régimen de penuria a acercarse a los modelos de las sociedades avanzadas, lo que significa, inevitablemente, importantes expectativas de incremento de su consumo energético.

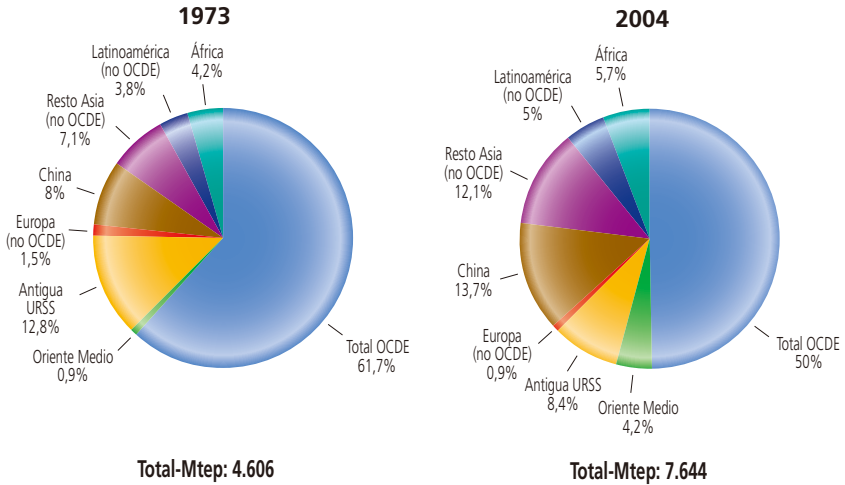
En las actuales proyecciones de crecimiento demográfico y de consumo energético publicadas por diferentes organizaciones internacionales como la OCDE y organizaciones privadas como el Consejo Mundial de la Energía se señala un incremento del 25% de población y del 50% de consumo energético en los próximos 20 años. Se sumarán 2.000 millones de nuevos seres humanos, la población de China y Europa, que demandarán luz, alimentos, trabajo digno, agua, enseres, etc.

Aunque desde ciertas perspectivas del pensamiento ecológico se quiera negar la evidencia, existe una alta correlación entre consumo energético y toda una serie de magnitudes económicas que facilitan el bienestar social. Así se puede comprobar en los gráficos siguientes cómo los países de mayor consumo de energía son los que presentan mejores niveles de bienestar y desarrollo económico. Porque mientras en unas socie-



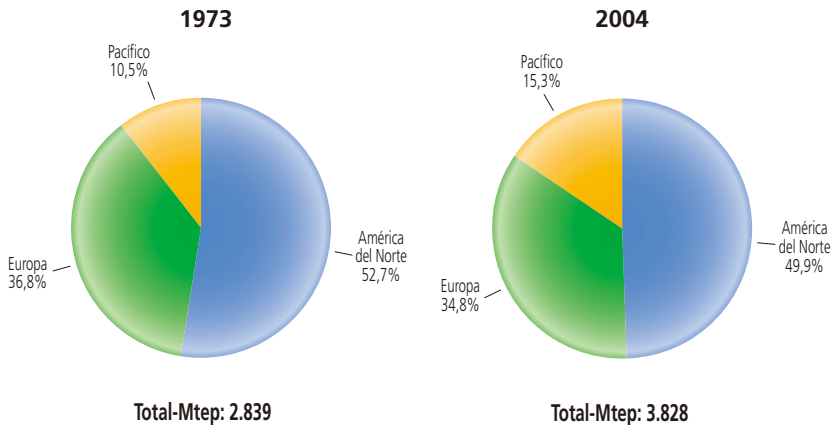
dades existe derroche (corregible educando conductas y utilizando el sistema socioeconómico), en otras lo que falta es lo mínimo, y para subsanarlo, inevitablemente se incrementará la demanda energética.

CONSUMO DE ENERGÍA FINAL EN EL MUNDO POR ZONAS ECONÓMICAS

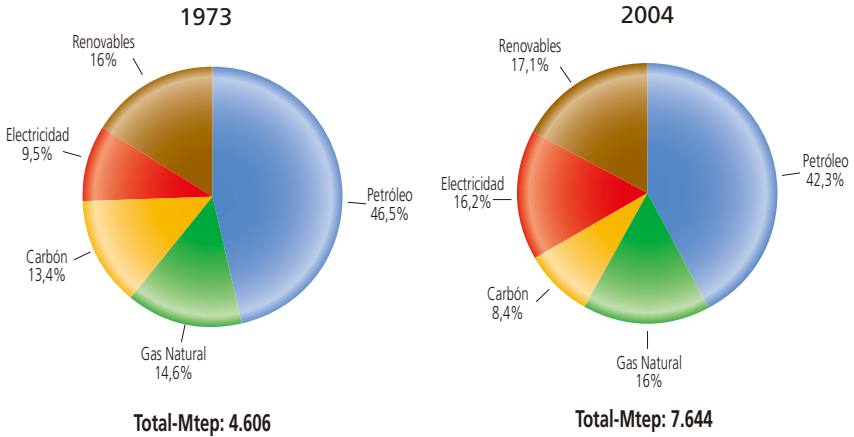


Fuente: AIE-2006.

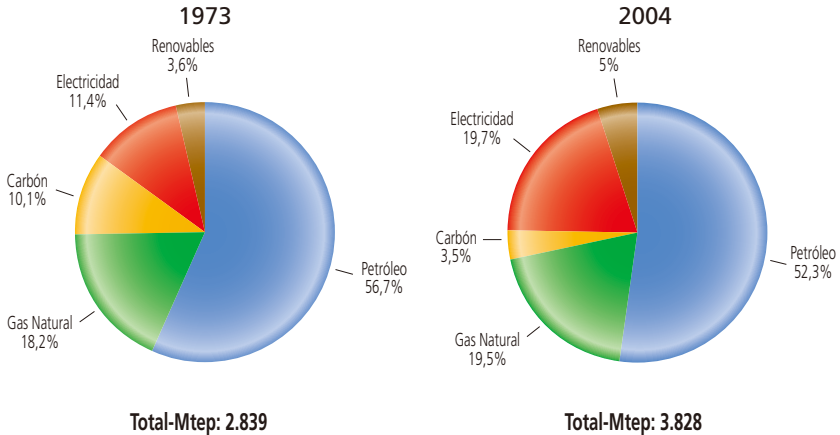
DESGLOSE OCDE



CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA FINAL POR FUENTES ENERGÉTICAS



DESGLOSE OCDE



La correspondencia entre el nivel de vida y el consumo energético se puede apreciar asimismo desde la perspectiva histórica, ya que existen evidentes relaciones entre crecimiento económico y mayor demanda de energía. Cuando un país empieza a avanzar por la senda del desarrollo, su estructura económica se caracteriza por un predominio de las actividades primarias



(agricultura, pesca), a las que se unen algunas artesanales, siendo, por tanto, su consumo energético bajo. Iniciado el proceso de crecimiento, la industria aumenta en importancia, lo mismo que los transportes, sectores ambos que requieren gran cantidad de energía. Si a lo anterior unimos la creciente mecanización de todas las actividades, incluidas las domésticas, parece evidente la importancia de la energía y la mayor demanda de ésta. No obstante, cierto es que la mayor eficacia técnica de las máquinas permite reducir progresivamente el uso de la energía para iguales niveles de producción.

Nota: La Organización para el Desarrollo Económico (OCDE) es una organización internacional compuesta por 30 países desarrollados cuyo objetivo es coordinar sus políticas económicas y sociales con el objetivo de promover el empleo, el crecimiento económico y la mejora de los niveles de vida en los países miembros y, asimismo, mantener su estabilidad y ayudar a la expansión económica en el proceso de desarrollo de los demás países. Los países miembros actuales son: Alemania, Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, España, EE.UU., Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza, Turquía (con carácter de fundadores en 1961), Japón (1964), Finlandia (1969), Australia (1971), Nueva Zelanda (1973), México (1994), República Checa (1995), Hungría (1996), Polonia (1996), Corea del Sur (1996) y Eslovaquia (2000).

23

¿QUÉ ENERGÍAS PRIMARIAS SE UTILIZAN EN EL MUNDO?

De todas las fuentes de energía aludidas en el capítulo anterior, únicamente cinco se emplean de forma masiva y por este orden en el mundo actual: petróleo, carbón, gas natural, nuclear de fisión y energía hidráulica. Suman el 95% del consumo mundial. Esto es algo importante a tener en cuenta porque, de momento, y con independencia de otras

energías denominadas nuevas, son las únicas que pueden responder en cantidad, calidad y precio a las necesidades energéticas de la humanidad.

Existen otras energías también empleadas bajo circunstancias muy diferentes. Así, en el llamado Tercer Mundo y para cubrir las necesidades domésticas se continúan empleando las históricas, (diversos tipos de biomasa, desde leña hasta residuos agrícolas, ...). En la actualidad es creciente la utilización de las energías renovables gracias al desarrollo del conocimiento y de las tecnologías que lo hacen posible junto con medidas políticas y económicas favorecedoras de su introducción en el mercado. Cabe citar sobre todo la energía eólica y en menor grado la solar junto a la biomasa. En grado solo de demostración pero sin un horizonte comercial despejado hay experiencias en la energía mareomotriz (Francia y Canadá) y geotérmica en Islandia con un aprovechamiento relativamente importante. Todas estas energías primarias renovables, descontadas la hidráulica y la eólica, tienen hoy una relevancia escasa y en bastantes países puramente anecdótica. Ello no es óbice para que debamos esforzarnos en su investigación y utilización, sobre todo en la eólica y en la solar.

24

¿CUÁL ES LA MEJOR FUENTE ENERGÉTICA?

No existe ninguna energía que cumpla hoy con todas las exigencias que demandan la economía y la sociedad. De existir debería cumplir con las siguientes características básicas:

1. Que garantizase el suministro tanto logrando su aprovisionamiento seguro como su disponibilidad en todo momento.
2. Que fuese accesible socialmente con precios aceptables.
3. Que fuese lo más respetuosa posible con el medio ambiente.

A la hora de decidir por una energía tenemos que considerar otro nuevo condicionante que surge de las condiciones de su uso final. Por ejemplo, el uso del carbón en la siderurgia, del gas y del petróleo en la industria química y el transporte y sobre todo de estos dos últimos en la producción de calor industrial. Para la generación eléctrica concursan las tres

con capacidad para garantizar la potencia y ayudadas por las renovables. Pero éstas, al no ser almacenables y ser imprevisibles, están limitadas a la hora de garantizar el suministro continuo y en los valores demandados.

Sin embargo no debemos olvidar las limitaciones que presentan cada una de las energías existentes.

Las energías fósiles tienen una gran densidad energética y son almacenables, pero generan en distinto grado gases del efecto invernadero, aparte de otros contaminantes. Además, son finitas en el tiempo, con mayor preocupación para el petróleo y el gas, ¿40 y 60 años de reservas? A esto hay que añadir el coste creciente, sobre todo del petróleo y del gas.

La energía nuclear de fisión cubre un horizonte temporal hasta lograr la de fusión en este siglo y debe resolver su controversia social. Es, sin duda, un factor de estabilidad en el abastecimiento y en la economía, por la estabilidad de precios que tiene. La energía nuclear de fusión es todavía una esperanza que de resolverse abrirá un futuro completamente diferente.

Las energías renovables están sometidas a la variabilidad climatológica, no son almacenables en términos industriales y no está garantizada su disponibilidad, pero ayudan a reducir el consumo de las energías fósiles. Su precio es todavía muy elevado y se requieren políticas de apoyo financiero externo. No son contaminantes, excepto la biomasa. La hidráulica puede ser todavía desarrollada en las economías emergentes pero con impactos ambientales que quizás ahora sean difíciles de aceptar.

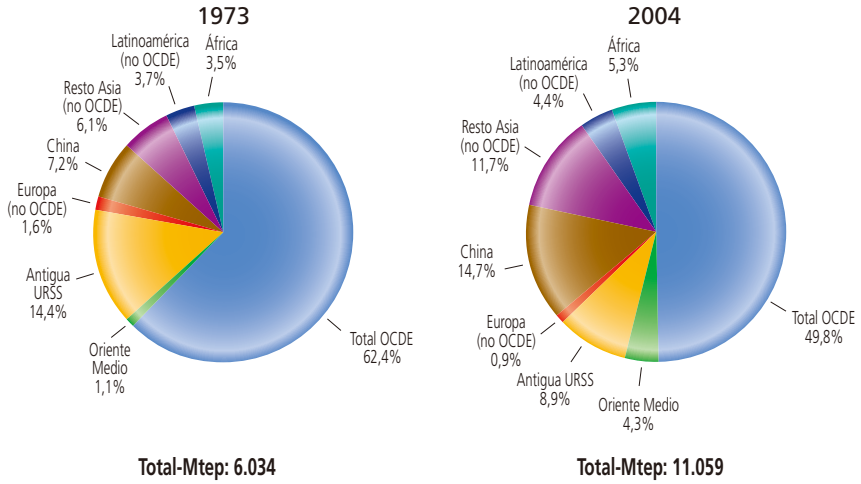
No existe la energía ideal y la solución energética hoy universalmente aceptada es definir una "cesta" energética que tendrá una definición específica según cada país y cada momento. No hay ninguna energía prescrita aunque en algunas sociedades se definan políticas restrictivas locales y temporales.

EQUIVALENCIA ENERGÉTICA DE COMBUSTIBLES

<i>Tipo de combustible</i>	<i>Equivalente Energético (J/kg)</i>	<i>Factor de comparación con el carbón</i>
Nuclear	$76,9 \times 10^{12}$	2,59 millones
Carbón	$29,6 \times 10^6$	1
Gas	$61,0 \times 10^6$	2,06
Fuelóleo	$46,8 \times 10^6$	1,58

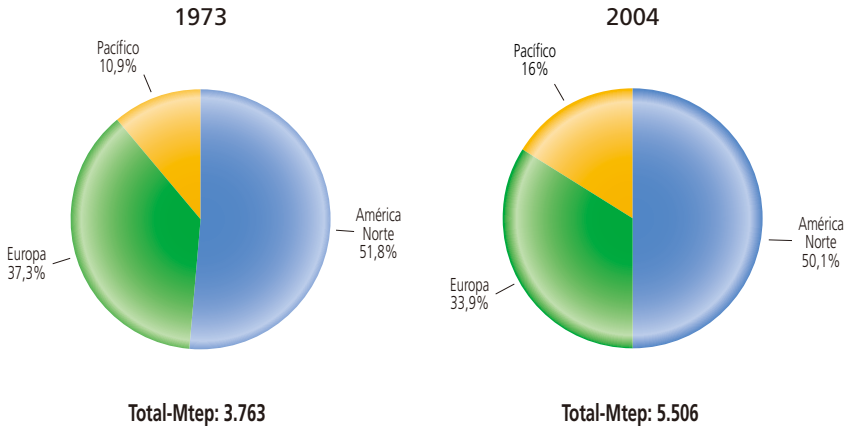
Fuente: CSN-Seguridad Nuclear, nº 36, 3º trimestre 2005.

ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA PRIMARIA EN EL MUNDO
POR ZONAS ECONÓMICAS



Fuente: AIE-2006.

DESGLOSE OCDE



¿CÓMO HA EVOLUCIONADO EL ABASTECIMIENTO MUNDIAL DE ENERGÍAS PRIMARIAS?

Finalizada la segunda guerra mundial y tras varios decenios de intenso crecimiento de la demanda energética, abastecida sin problemas por una producción en continuo ascenso y un precio del petróleo muy alejado del valor real, menos de 5 \$/barril, el brutal ascenso de éste hasta valores de 30 \$ unido al conflicto bélico árabe-israelí provocado en Oriente Medio en 1979, desencadena una crisis económica que frena el consumo e incluso origina un retroceso del mismo, incrementándose pocos años después, en la década de los 80, por un nuevo rebrote bélico desencadenante de una nueva escalada del precio del crudo.

El cambio en la evolución de la demanda se debió fundamentalmente a dos factores: el efecto renta y el efecto sustitución. El primero fue una consecuencia directa de la generalizada crisis económica, pues dada la relación existente entre bienestar material y consumo energético, el retroceso de aquél (medido en términos de producto por persona, paro, inflación e incertidumbre) afectó a éste en igual sentido.

El efecto de sustitución empezó a evidenciarse claramente con el encarecimiento de la energía, procurándose, a corto plazo, un ahorro energético a través de un consumo más racional; y a medio plazo, reemplazando los equipos y máquinas de alto requerimiento energético por otros que, con similares resultados, consumiesen menos energía. La innovación jugó aquí un importante papel y se encontró una alternativa en la energía nuclear para la producción eléctrica con la puesta en marcha de importantes inversiones.

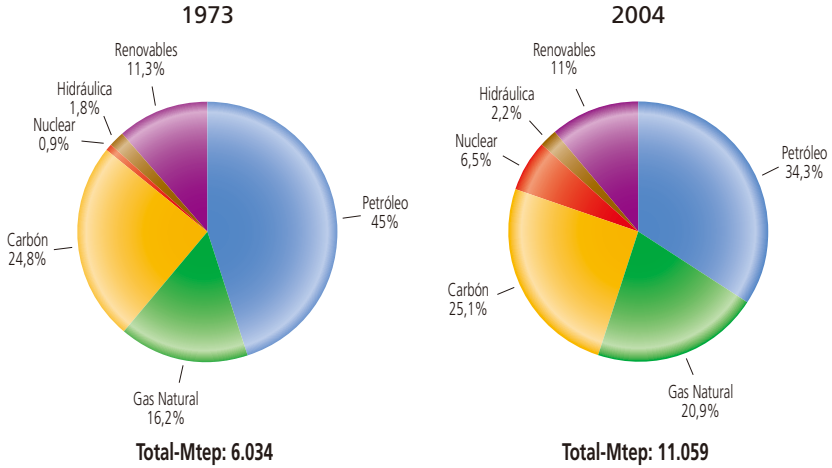
Así mismo, surge en esta época un nuevo factor que va a adquirir una gran relevancia hasta hoy. El factor social desencadenado por una nueva cultura que destaca nuevos valores como el medioambiental así como conductas y que altera usos y costumbres de todo tipo y condición con repercusiones indudables en las decisiones económicas, los acuerdos sociales y los proyectos tecnológicos.

Si se observa lo ocurrido según la evolución en el consumo de energías primarias, se puede ver que las energías que más se encarecieron fueron penalizadas en el consumo. Ello respondió al éxito de la actuación de los gobiernos que pusieron en práctica políticas de ahorro y medidas para desincentivar y corregir el consumo energético. Así, por ejemplo, el petróleo llegó a perder en el período 1973-1997 casi diez puntos porcentuales dentro del total del abastecimiento energético mundial. Por el contrario, el carbón se mantuvo casi estable, dato este significativo por cuanto hasta el inicio del período considerado estuvo descendiendo notablemente al ser sustituido por los hidrocarburos, hasta entonces muy asequibles. Como ya se ha indicado hay que destacar el fuerte incremento de la energía nuclear, cuya aportación en términos relativos fue en continuo crecimiento debido principalmente a su bajo coste. Hay que resaltar la importancia que la electricidad adquiere como energía final de consumo debido a la calidad de su suministro que es percibida por el consumidor que sustituye el uso del carbón.

Desde mediados de los años 80, la recuperación económica de los países industrializados, junto a los fuertes descensos en los precios de los crudos y del carbón, propiciaron el inicio de un nuevo ciclo del crecimiento del consumo, con máximos históricos en los años sucesivos hasta la crisis financiera desencadenada por la burbuja tecnológica en 2000, ya superada, pero que no supuso alteraciones en los precios energéticos. El petróleo se situó en una banda estable entre los 10 y 20€.

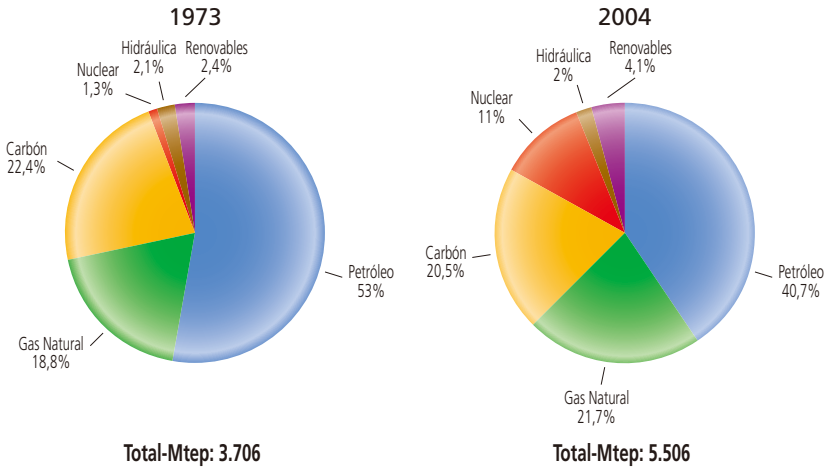


EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LAS ENERGÍAS PRIMARIAS EN EL MUNDO POR FUENTES ENERGÉTICAS



Fuente: AIE-2006.

DESGLOSE OCDE



¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES ÁREAS GEOGRÁFICAS DE CONSUMO Y DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA?

Si agrupamos a los países en función de criterios de homogeneidad geográfica, se pueden identificar una serie de áreas en las que se singularizan algunos países según su consumo energético y otros por su producción.

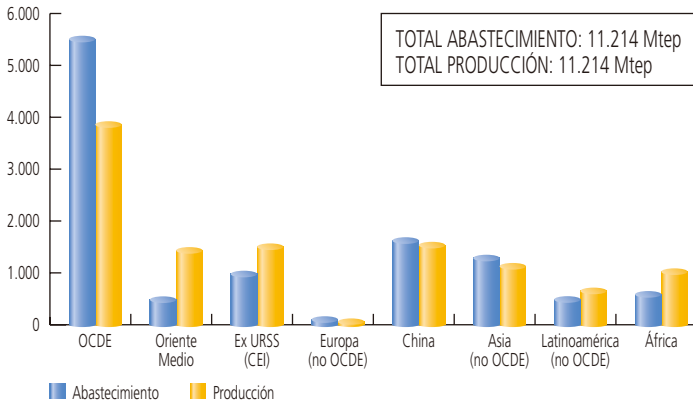
Los cambios habidos en el mapa político, unificación de Alemania y desmembración de la URSS y Yugoslavia, no tienen una especial influencia en lo que al mapa energético se refiere, ya que sus repercusiones parciales tardarán todavía bastantes años en ser recogidas en las estadísticas energéticas mundiales.

Así pues, considerando la situación según las áreas clásicas, nos encontramos con las características siguientes:

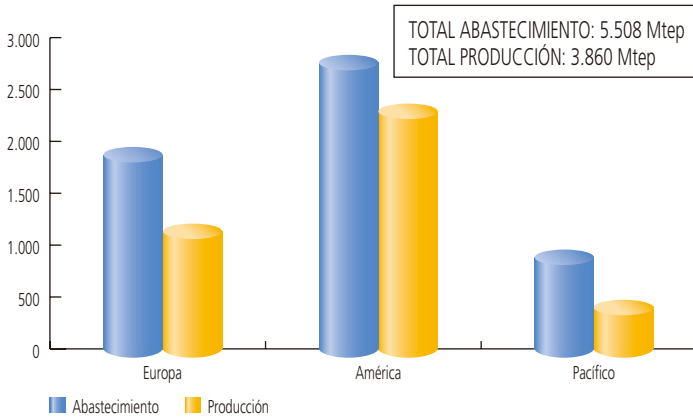
LA ENERGÍA EN EL PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL (2004)

Zona/País	Población (Millones)	PIB (Miles mill. \$US)	Producción de Energía (Mtep)	Impor- taciones Netas (Mtep)	Abastecimiento de Energía Primaria (Mtep)	Consumo Eléctrico (TWh)	Emisión CO ₂ (Mt de CO ₂)
Mundo	6.352	35.025	11.213	—	11.223	15.985	26.583
OCDE	1.164	27.698	3.860	1.742	5.508	9.548	12.911
Oriente Medio	182	740	1.437	-942	480	524	1.183
Antigua Unión Soviética	286	491	1.508	-521	979	1.184	2.313
Europa (no OCDE)	54	145	63	44	104	166	265
China	1.303	1.904	1.537	115	1.626	2.094	4.769
Asia (no OCDE)	2.048	1.822	1.127	191	1.290	1.264	2.499
Latinoamérica (no OCDE)	443	1.541	655	-161	485	729	907
África	872	685	1.027	-435	586	477	814

ABASTECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA POR ÁREAS EN 2004 (Mtep)



DESGLOSE OCDE EN 2004 (Mtep)



Fuente: AIE-2006. América del Norte (OCDE América) reúne la doble condición de ser una de las áreas con mayor consumo energético y de más amplia y diversa producción. Lo primero es debido al descomunal peso del consumo de los Estados Unidos, que desequilibra el balance energético de la zona, dotada de ingentes recursos de carbón, petróleo, gas natural, hidroelectricidad y uranio.

OCDE Europa, con una producción insuficiente para cubrir sus amplias necesidades energéticas, precisa importar un porcentaje significativo (50%) de lo que consume, fundamentalmente petróleo procedente de la OPEP. Algunos de los países de esta zona tienen, sin embargo, importantes capacidades productivas de ciertas energías primarias: éste es el caso de Alemania y el Reino Unido, en carbón; de Holanda, en gas natural; de Noruega y Reino Unido, en petróleo; de Francia y Alemania en energía nuclear.

OCDE Pacífico (Australia, Corea del Sur y Japón) es también deficitario, debido al elevado consumo de Japón, país no demasiado dotado de recursos aunque con importante producción hidroeléctrica y nuclear. Últimamente Australia ha surgido como un gran productor y exportador de carbón, elevando algo las reducidas cifras de la zona, que, como Europa Occidental, realiza masivas importaciones de crudo procedente de la OPEP.

La ya desaparecida Unión Soviética ha sido el mayor estado productor de energía y el segundo en consumo, con un excedente que ha abastecido las necesidades de los países del Este de Europa —durante décadas bajo la órbita soviética— y ha exportado a Occidente. Rusia es la que cuenta con los mayores recursos energéticos.

Europa no OCDE presenta saldo deficitario debido a un cierto nivel de consumo y a la falta de hidrocarburos. Su producción energética está centrada en el carbón, destacando Polonia, tanto por la cuantía de su oferta interna, como por ser el único país del grupo con saldo neto exportador. La reunificación alemana aumentó su déficit energético, pues la calidad y competitividad de las minas de carbón de la antigua Alemania Oriental son muy cuestionables.

La OPEP, organización o cartel exportador de petróleo, presenta un débil consumo frente a una enorme riqueza de hidrocarburos,



que vende, sobre todo, a los países industrializados de Occidente. Su papel como equilibrador del balance energético mundial es sencillamente clave.

América no OCDE, con bajos niveles de consumo y producción, presenta un superávit energético no muy relevante, pues si excluimos de la zona a Venezuela, Ecuador, integrados en la OPEP, y México, gran exportador de petróleo, no integrado en esa organización, desnivela el saldo hacia el lado positivo.

En el resto del mundo, auténtico cajón de sastre, hay numerosos países de baja producción y consumo, con las excepciones de China, India y Sudáfrica.



¿QUÉ ES UNA CRISIS ENERGÉTICA?

Se puede definir como un desajuste temporal entre la oferta y la demanda energética que se salda, de forma habitual, con fuertes incrementos de los precios de las distintas energías. Esto último se da, obviamente, en el caso de que la oferta sea superada por la demanda, desencadenante de la crisis desde la perspectiva de una nación importadora, como es el caso de los países del mundo occidental, en general, y de España en particular. Sin embargo, desde la óptica de un país exportador, caso de los países de la OPEP, la crisis surgiría cuando hubiera un exceso de oferta que ocasionara una caída de los precios energéticos o aparecieran señales económicas en el mercado en forma de elevación de precios anticipatorias de un próximo agotamiento de los recursos energéticos. Si se acepta este doble enfoque de crisis, es preciso reconocer que estas son bastante habituales en la historia económica contemporánea. No obstante, y por las razones apuntadas, la idea de crisis más generalizada es la primera.

El desencadenamiento de las crisis energéticas suele ocurrir cuando los tirones alcistas de la demanda —impulsados por el crecimiento económico— no van acompañados de incrementos paralelos de la producción, pues hay un gran retraso entre la explotación comercial de un nuevo yacimiento y la finalización de la construcción de una central eléctrica.

El ajuste, vía precios, entre una demanda desbordante y una oferta incapaz de satisfacerla en cantidad y calidad constituye un mecanismo de equilibrio, pues los altos precios precipitan una nueva oleada de inversiones en busca de nuevos yacimientos, nuevas fuentes de energía o nuevas técnicas de uso que, finalmente, restablecerán el equilibrio entre la oferta y la demanda.

¿CUÁL HA SIDO EL IMPACTO DE LAS CRISIS ENERGÉTICAS SOBRE LA ECONOMÍA MUNDIAL?

Por su carácter paradigmático y por ser la más destacada, podemos centrarnos en la crisis energética iniciada en octubre de 1973 con la subida de los precios de los crudos y las restricciones de oferta aplicadas por los países de la OPAEP (Organización de los Países Árabes Exportadores de Petróleo). Aunque los efectos fueron múltiples, algunos, por su relevancia, merecen ser destacados:

- Se cerró un largo período de precios energéticos bajos y decrecientes y se abrió otro de precios altos y crecientes que duró casi un decenio.
- El alza de los precios de los crudos —hecho desencadenante— fue acompañado de elevaciones, algo menores, en los precios de otras energías primarias.
- El carácter aleatorio e imprevisible de las alzas de los precios de los crudos, unido a su falta de relación con los costes de extracción, provocó graves incertidumbres a corto y medio plazo sobre la conveniencia de realizar grandes esfuerzos inversores, tanto para desarrollar nuevas fuentes energéticas, como para investigar los recursos de las ya conocidas.
- Los países industriales, todos grandes importadores de crudos, vieron sus economías muy afectadas por el alza de precios. De entrada, sufrieron un grave quebranto en sus balanzas comerciales, pero, además, su crecimiento cayó en picado, a la vez que sus tasas de inflación llegaron a los dos dígitos, elevándose también el paro muy por encima de las cifras del decenio precedente.
- Dadas las interdependencias existentes en la economía mundial, la recesión de los países industrializados no tardó en generalizarse al resto, sobre todo por la vía del comercio internacional, que experimentó una fuerte contracción.

- Los países exportadores de productos petrolíferos, como era lógico esperar, se vieron beneficiados, obteniendo enormes superávits en sus balanzas comerciales al aumentar considerablemente sus ingresos, casi exclusivamente basados en la venta de crudos. Las reservas de divisas que acumularon, pues a corto plazo apenas si aumentó su propensión a importar, colocadas en los principales centros financieros internacionales —Nueva York y Londres— beneficiaron a algunos países desarrollados, pero sometieron a grandes tensiones al sistema financiero internacional.
- Los aumentos del precio de la energía, la inflación subsiguiente y las políticas de ajuste provocaron cambios en la división internacional del trabajo, pues mientras ciertos países perdieron competitividad y cuota de mercado, otros aprovecharon la situación al tener ventajas de especialización en sectores no intensivos en energía.

29

¿HAY ESCASEZ DE ENERGÍA EN EL MUNDO?

Se trata de una cuestión controvertida. Hasta ahora el mercado ha estado abastecido y suficientemente diversificado con energía abundante y barata (el precio del petróleo en valor constante ha sido inferior al alcanzado en la crisis de los pasados años 70). Pero también hay ya tensiones en el mercado ante el crecimiento de la demanda de las economías emergentes (Asia y Latinoamérica) que anuncian que estamos próximos a concluir el ciclo de extracción “barata” de los hidrocarburos.

Sabemos, ciertamente que en un indeterminado “medio o largo plazo” los combustibles fósiles se agotarán y que son necesarios combustibles sustitutorios y desarrollar las tecnologías adecuadas para su uso. La dificultad radica en concretar, en los análisis de detalle del corto y medio plazo, las fechas y condiciones reales para plantear las correspondientes estrategias de sustitución, tanto en combustibles como en tecnologías.

Téngase en cuenta que para ello, la valoración de los recursos energéticos depende de múltiples factores, entre ellos los económicos (coste de extracción y precios aceptables por el mercado) y los referentes a las tec-

nologías de extracción y de utilización (crece la eficiencia energética y los rendimientos obtenidos).

Sirve como ejemplo la disponibilidad de tecnologías de prospección capaces de perforar fondos marinos de 2.000 metros de profundidad y que permiten aflorar existencias de petróleo y gas antes inaccesibles.

No es extraño, por tanto, verificar que los informes de duración de las reservas de petróleo y gas publicados a lo largo de los últimos 30 años hayan mantenido plazos de agotamiento de estos recursos en un rango entre los 40 y 60 años, mientras el consumo se ha incrementado en porcentajes próximos al 50% (ver capítulo 3, pregunta 31).

Sin embargo, sí es importante tener muy en consideración que los combustibles fósiles son finitos y parece que petróleo y gas pueden estar agotados en este siglo. No obstante, es seguro que aparecerán con suficiente antelación señales y tensiones en el mercado que anunciarán la próxima situación de carencia. Algunos análisis anuncian que podemos estar ante el fin de la era del petróleo y del gas barato.

Con la información actual, el agotamiento del petróleo y del gas puede tener lugar en el transcurso de este siglo. Las enormes reservas de carbón garantizan su uso más allá de 200 años. El uranio con las actuales tecnologías concluiría también en este siglo, pero nuevos desarrollos tecnológicos en marcha y decisiones políticas como reprocesar el combustible gastado extenderían ese plazo de forma importante. Además, el torio es otro posible combustible nuclear de amplias reservas hoy sin explotar (ver capítulo 9). En este análisis hay que incluir las repercusiones de la protección medioambiental, con la preocupación creciente por las emisiones de gases del efecto invernadero de los combustibles fósiles, lo que alterará las condiciones económicas del mercado y por ello puede animar a la innovación tecnológica.

En el siguiente capítulo se entra más en detalle en el análisis de los recursos. En todo caso, en estos primeros años del presente siglo XXI se perfila la gran preocupación ante el enorme crecimiento de la demanda que anuncian las sociedades de las economías emergentes (China, India, Corea, Brasil, México, etc.). Todas las energías son necesarias pero está claro que recurriremos al empleo intensivo de los abundantes recursos de carbón, expandiremos en la medida de lo posible las energías renovables y la energía nuclear (fisión y fusión), que desempeñará un papel decisivo en el suministro y equilibrio de las necesidades energéticas del mundo.

¿POR QUÉ DEBE AHORRARSE ENERGÍA?

Los recursos energéticos no son ilimitados, aunque sean relativamente abundantes. Desde el punto de vista económico son bienes escasos y, por tanto, su uso debe ser racional, evitándose el despilfarro. Esto implica que debe obtenerse el máximo aprovechamiento de la energía empleada, evitándose pérdidas innecesarias en la extracción, manipulación, transporte y consumo, utilizando técnicas y máquinas eficientes. Para el consumidor final, deberán imponerse precios disuasorios que penalicen el derroche y la dilapidación. Con ello, sin afectar al nivel de vida, se logrará prolongar al máximo los recursos actualmente disponibles, encaminando la transición hacia nuevas energías que eviten así situaciones traumáticas con elevaciones desmesuradas de los precios, reflejo, en la mayoría de las ocasiones, de una insuficiencia relativa de estos.

En definitiva se trata de considerar el principio ético de solidaridad intergeneracional considerado en el principio del desarrollo sostenible: “gestionar las necesidades del presente de forma que se tengan en consideración las necesidades de las futuras generaciones”.

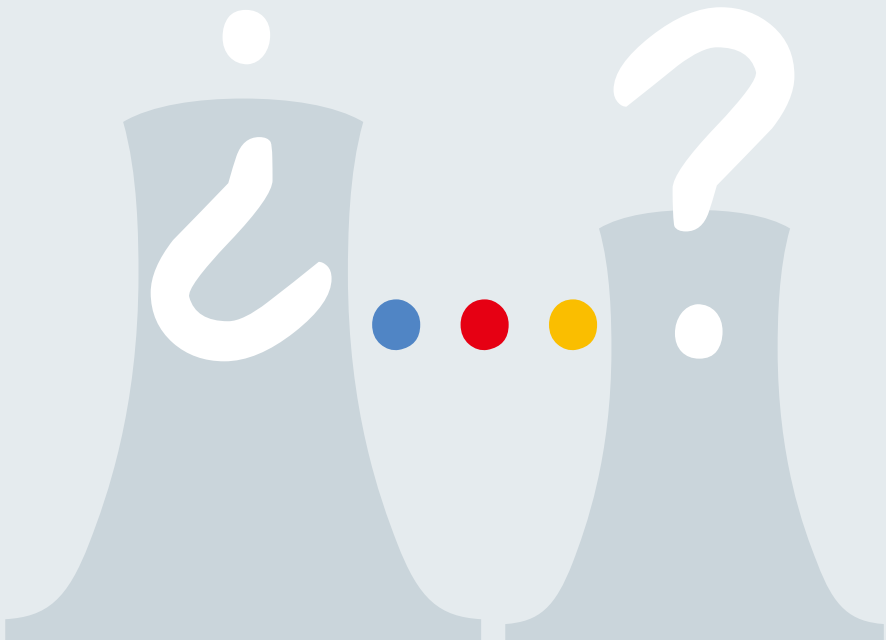


Campaña sobre ahorro energético



CAPÍTULO
3

PRINCIPALES
FUENTES
DE ENERGÍA





Los combustibles fósiles, que son almacenables y de gran densidad energética, abastecen el 80% del consumo energético mundial y son una materia prima insustituible de la industria, pero sus reservas se agotarán. Para el gas y el petróleo muy posiblemente suceda en este siglo. Su sustitución plantea un desafío de enormes proporciones que tiene que solventarse con una visión a largo plazo y con tecnologías acreditadas.

31

¿QUÉ SE ENTIENDE POR RECURSOS Y RESERVAS ENERGÉTICOS?

El mero conocimiento y cuantificación de la existencia de materias energéticas no significa necesariamente que éstas se puedan emplear para la obtención de energía útil. Para ello, además tiene que ser técnicamente posible su explotación y económicamente rentable la misma, es decir, que los costes de extracción sean inferiores a los precios del mercado. Asimismo, es preciso que la energía útil que se obtenga del recurso sea muy superior a la consumida en su extracción y transformación. Las cantidades de materia energética que cumplan todos estos requisitos se denominan reservas, que pueden aprovecharse para su transformación en energía útil en condiciones económicas rentables. Al resto de las cuantificadas se la denominan recursos. La proporción de recursos que pasan a ser reservas, sin descubrirse nuevos yacimientos, aumentan a medida que se abaratan técnicamente los costes de explotación por los avances en las tecnologías de extracción y explotación, o bien porque en el mercado alcanzan un mayor precio que hace viable las nuevas inversiones. Así, la fuerte elevación de los precios del petróleo en 1973 provo-

có que el crudo del Mar del Norte dejase de considerarse únicamente recurso para considerarse reserva. También la disponibilidad de tecnologías de perforación y extracción a más de 2.000 metros de profundidad en los océanos abre al mercado importantes recursos energéticos hasta ahora inaccesibles.

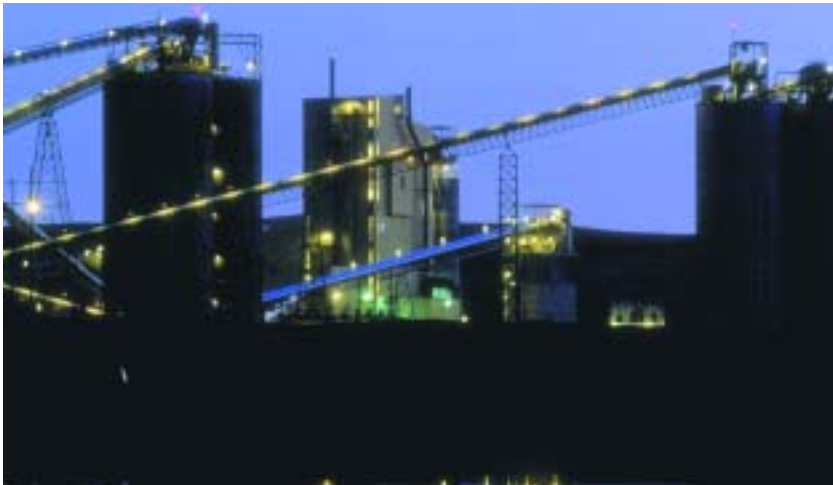
La diferenciación entre recursos y reservas es fundamental en el análisis económico de la energía y decisiva para una planificación racional, puesto que, mientras que los recursos energéticos son muy abundantes, las reservas energéticas son muy escasas, aunque bastante variables.

EVOLUCIÓN DE LAS RESERVAS PROBADAS DE PETRÓLEO Y GAS.

Factor R/P

	1984	1994	2004	Duración Reservas R/P actual	Evolución R/P 1981 a 2003
Petróleo-10 ⁹ barriles	761	1.017	1.185	42 años	31 a 42 años
Petróleo-%	100%	134%	156%		
Gas-10 ¹² m ³	96	142	179	67 años	59 a 67 años
Gas-%	100%	148%	186%		

Fuente: BP-estadísticas 2004. Factor R/P = Reservas/Producción actual = n° años.



¿QUÉ PAPEL JUEGA EL CARBÓN EN EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO MUNDIAL?

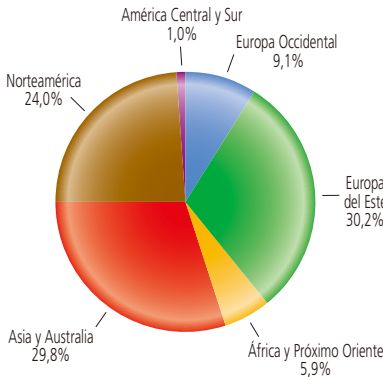
El carbón continúa teniendo una notable relevancia dentro del consumo mundial ya que actualmente cubre en torno al 25% de la demanda energética mundial, situándose todavía como la segunda fuente primaria, únicamente superada por el petróleo, pero aventajando al gas natural, a la energía nuclear y a la hidroelectricidad. Así pues, el carbón aún ocupa hoy un lugar muy importante dentro de un sector tan fundamental para la economía mundial como es el energético. Sin embargo, este relevante papel no debe enmascarar el continuo declive que el carbón viene experimentando desde poco después de la Primera Guerra Mundial, retroceso solo interrumpido por la breve y efímera recuperación de finales de los 70 y comienzos de los 80, a causa de los dos choques petroleros. En consecuencia, el carbón acumula dentro de la estructura energética mundial dos características de distinto signo: es muy importante por las enormes reservas disponibles, pero debe resolver su carácter contaminante y la penalización de emisiones de CO₂ del protocolo de Kioto.

El principal empleo actual del carbón es como combustible para producir electricidad en centrales térmicas. En el caso del lignito —la variedad de menor valor comercial— este uso es prácticamente el único. También para la antracita el uso térmico es el principal, aunque también se utiliza en los hogares y en las industrias ubicadas en zonas próximas a los yacimientos. La hulla, que sigue siendo cuantitativa y cualitativamente la variedad más importante del carbón, se utiliza en centrales térmicas y en la siderurgia integral, tras su transformación en coque.

¿DÓNDE SE ENCUENTRAN LAS RESERVAS Y LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN?

Los recursos estimados de carbón son ingentes. Según los más recientes cálculos del Consejo Mundial de la Energía son superiores al billón de toneladas, cantidad que se reparte casi a partes iguales entre hulla y antracita (519.700 millones de toneladas) y lignito (524.130 millones de toneladas). Para mejor valorar la magnitud de estas cifras utilizaremos el típico indicador Recursos/ Producción, que nos da el número de años durante los cuales se podría mantener una producción como la actual bajo la hipótesis de que no se descubrieran nuevos recursos. Pues bien, en el caso del carbón habría recursos para más de dos siglos y medio.

DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS MUNDIALES DE CARBÓN (%)



PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES EN 2004 (Mt)

China	1.956
India	130
EE.UU.	1.009
Australia	354
Rusia	280
Sudáfrica	100
Indonesia	129
Polonia	106
Kazajstán	87
Ucrania	62
Resto	830
Total	5.508

¿SIGUE SIENDO EL PETRÓLEO BÁSICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO MUNDIAL?

El petróleo es con diferencia la más importante de las energías primarias con las que cuenta actualmente el mundo. Esto es así desde hace casi medio siglo, al acabar el proceso de sustitución del carbón que se había iniciado en el último tercio del siglo XIX.

Cuantitativamente, el petróleo abastece en torno al 40% de las necesidades energéticas mundiales, aventajando en unos 13 puntos porcentuales a la energía primaria que le sigue en importancia: el carbón. Cualitativamente su importancia se debe a su extraordinaria utilidad, derivada de sus múltiples aplicaciones, como al transporte (terrestre, marítimo y aéreo), calefacción, plásticos, fibras textiles artificiales, pinturas, detergentes, explosivos, fertilizantes, asfaltos, etc. En algunos de esos usos los derivados del petróleo son sencillamente insustituibles, este es el caso de las gasolinas, gasóleos, etc.

Existen otras importantísimas razones que avalan el carácter fundamental del petróleo en la economía actual. Por un lado, una relativa y amplia presencia de países productores: más de medio centenar de países producen por encima del millón de toneladas al año y unos 25 superan los diez millones de toneladas, aunque sean las empresas de prospección y distribuidoras los agentes finales determinantes de haber hecho posible esas extracciones. Por otro lado está su inicialmente bajo coste de extracción, que en los grandes países productores exportadores no sobrepasaba los seis o siete dólares el barril. Sin embargo hoy ese barril alcanza un precio en el mercado del orden de 70 \$. Finalmente, hay que resaltar el papel central que tiene el precio del crudo dentro del sistema energético mundial en el sentido de que sus oscilaciones afectan decisivamente al resto de las energías primarias y no se da lo contrario.

El petróleo, al mismo tiempo, se ha convertido en un arma colosal de acción geopolítica, pues los países productores no son los países consumidores, con grandes desequilibrios socioeconómicos entre ellos, y esto se traduce en la afloración de fuertes tensiones en la política internacional.

No debe olvidarse, en cualquier caso, que el petróleo es un recurso que inevitablemente se agotará.

35

¿QUÉ ES LA OPEP?

La Organización de Países Exportadores de Petróleo nació en agosto de 1960 ante la fuerte y continua caída de los precios de los crudos que se dio en la segunda mitad de la década de los 50, afectando gravemente a una serie de países exportadores cuyos ingresos estaban (todavía lo están hoy) basados total o fundamentalmente en la venta de crudo. La iniciativa para la constitución de la OPEP partió de Venezuela, Arabia Saudí, Irak, Irán y Kuwait, a los cuales se unirían Qatar e Indonesia. Estos siete grandes expor-



tadores son pues los socios fundadores de una organización cuyo objetivo oficial es el de asegurar a los países productores una participación sustancial en los beneficios de la explotación de los crudos, en aquella fecha controlada por las grandes multinacionales. A más largo plazo se proponía el control de las reservas y de su explotación, objetivo que lograría tras los Acuerdos de Nueva York (octubre de 1972). A los siete países fundadores se agregarían más tarde Libia (1962), Abu Dhabi (1967), Argelia (1969), Nigeria (1971), Ecuador y Gabón (1973). Otros importantes países exportadores de crudo como Méjico, Rusia y Noruega, sin pertenecer a la OPEP, han venido alineando sus precios de venta con los fijados por la organización.

Aunque durante sus primeros diez años de funcionamiento la OPEP no fue muy eficaz en la defensa de sus intereses, a partir de 1971, tras los Acuerdos de Trípoli y de Teherán se convirtió en un poderoso cártel petrolero, capaz de presionar sobre los mercados de crudos con gran vigor, bien elevando directamente los precios, bien haciéndolo indirectamente al reducir la oferta mediante el establecimiento de cuotas de exportación a sus miembros.

Actualmente, la OPEP, cuya sede está en Viena, no sigue una política antioccidental como la que aplicó en los años 70. Al contrario, desde 1980 —tras la 59 reunión de Ministros del Petróleo— la OPEP ha mantenido una política de cooperación con los países industriales importadores de petróleo, como claramente se puso de manifiesto durante la crisis del Golfo, en el verano-otoño de 1990.



¿DÓNDE SE ENCUENTRAN LAS RESERVAS DE PETRÓLEO Y QUÉ PAÍSES SON LOS PRINCIPALES PRODUCTORES?

Actualmente las reservas de petróleo se estiman en algo más de un billón de barriles (unas 160.000 millones de tep), lo que permitiría garantizar la actual producción durante 43 años aproximadamente, bajo el supuesto, muy improbable, de que no se descubriesen en el futuro nuevas reservas.

Esas reservas están muy concentradas, pues dos terceras partes corresponden a cinco países que se asoman al Golfo Pérsico (Arabia Saudí el 26%; Irak y Kuwait el 10% cada uno; Irán y Abu Dhabi el 9% cada uno). Otros países con reservas considerables son: Venezuela (6,3%), México (5,0%), Rusia (4,8%), y EE.UU. (3,1%). En su conjunto, los países de la OPEP disponen de más del 75% de las reservas totales.

PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE CRUDO (Mt/año)

	1985	1996	2004	% 2004
Arabia Saudí	182	429	492	13%
EE.UU.	503	383	337	9%
Irán	110	184	203	5%
Méjico	150	164	192	5%
Venezuela	90	162	153	4%
China	130	159	174	4%
Noruega	40	156	151	4%
Reino Unido	128	130	130	3%
Canadá	86	114	151	4%
Kuwait	54	107	107	3%
Nigeria	73	106	129	3%
Total Mundial	2.809	3.362	3.888	100%

Fuente: AIE 2005 y BP.

¿QUÉ IMPORTANCIA TIENE EL GAS NATURAL?

El gas natural es una de las energías primarias de utilización más reciente, puesto que hasta la segunda década del siglo XX no comenzó su comercialización en Estados Unidos, país pionero en su producción y consumo, no extendiéndose su empleo a Europa Occidental hasta después de la Segunda Guerra Mundial, aunque su conocimiento se remonta, al menos, al comienzo de la explotación comercial del petróleo.

Las razones que explican la creciente utilización del gas natural en el mundo, en sustitución de otros combustibles, son diversas, pudiendo sintetizarse en los siguientes puntos:

- a) Alto poder calorífico.
- b) Mayor limpieza ambiental frente al resto de combustibles fósiles al generar menores cantidades de CO₂ del efecto invernadero y por ello menos penalizada por el protocolo de Kioto y la asignación de emisiones.
- c) Comodidad de utilización para la generación de calor en consumos domésticos e industriales.
- d) Importancia de su utilización en procesos industriales, como, por ejemplo, en los tratamientos de endurecimiento y como elemento de síntesis.
- e) Versatilidad, pues el gas natural puede competir con las restantes energías primarias en un 70% de sus empleos, básicamente en los procesos de generación de calor.

Sin embargo, el gas natural tiene sus precios indexados, es decir relacionados proporcionalmente con el precio del petróleo y unas reservas que con el ritmo previsible de consumo pueden estar agotadas a medio plazo.

¿CUÁLES SON LAS RESERVAS Y LA PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL?

Las reservas de gas natural son de 182 billones de m³ y se distribuyen de forma muy desigual en el mundo ya que entre la antigua URSS (CEI) (32%) y el Oriente Medio (41%) concentran tres cuartas partes del total mundial, concentración mayor que la que se da en el petróleo.

DISTRIBUCIÓN POR PAÍSES DE LAS RESERVAS DE GAS NATURAL (2004) (billones de m³)

Ex-URSS (CEI)	57,4	Noruega	3,7
Irán	29,1	Irak	3,1
Qatar	25,8	Indonesia	2,8
Arabia Saudí	6,8	Malaysia	2,4
Abu-Dhabi	5,6	Australia	2,4
EE.UU.	5,4	China	2,2
Nigeria	5,3	Egipto	1,8
Argelia	4,5	Canadá	1,5
Venezuela	4,2	Kuwait	1,5

Por otro lado, la producción está también muy concentrada, destacando los casos de Estados Unidos y Rusia, cuya producción conjunta se acerca a la mitad de la mundial.

PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE GAS NATURAL EN 2004 (Mm³)

Rusia	620.095	22,2%	Noruega	82.340	2,9%
Estados Unidos	531.951	19,0%	Irán	81.332	2,9%
Canadá	182.564	6,5%	Indonesia	79.498	2,8%
Reino Unido	101.182	3,8%	Arabia Saudí	63.999	2,3%
Argelia	88.337	3,2%	Resto	877.235	31,5%
Holanda	85.983	3,1%	Total	2.794.256	100%

¿QUÉ IMPORTANCIA TIENE LA ENERGÍA HIDRÁULICA?

La energía hidráulica es la única de las renovables que ha tenido y tiene una importancia destacable en el abastecimiento energético mundial. Su aportación creció bastante a lo largo de las décadas de los años 60, 70 y 80, llegando a alcanzar el 6% del consumo total; sin embargo, en los últimos años su relevancia ha disminuido de forma notoria, suponiendo en 1997 únicamente el 2,6%.

Es de tener en cuenta que aunque el flujo de agua en los ríos es inagotable, los emplazamientos en donde se pueden construir centrales hidroeléctricas en razonables condiciones económicas son limitados. Por otro lado, ha aumentado apreciablemente la sensibilidad ante los efectos medioambientales de los represamientos de los ríos, lo que, unido a los elevados costes de transporte a largas distancias de la electricidad, explica el retroceso de esta energía primaria en términos relativos.

Únicamente en los países más desarrollados la explotación eléctrica de los recursos hidráulicos ha alcanzado un gran nivel. Por el contrario, en la parte del planeta ocupado por los países en vías de desarrollo su explotación es aún incipiente, debido a los altos requerimientos de capital.

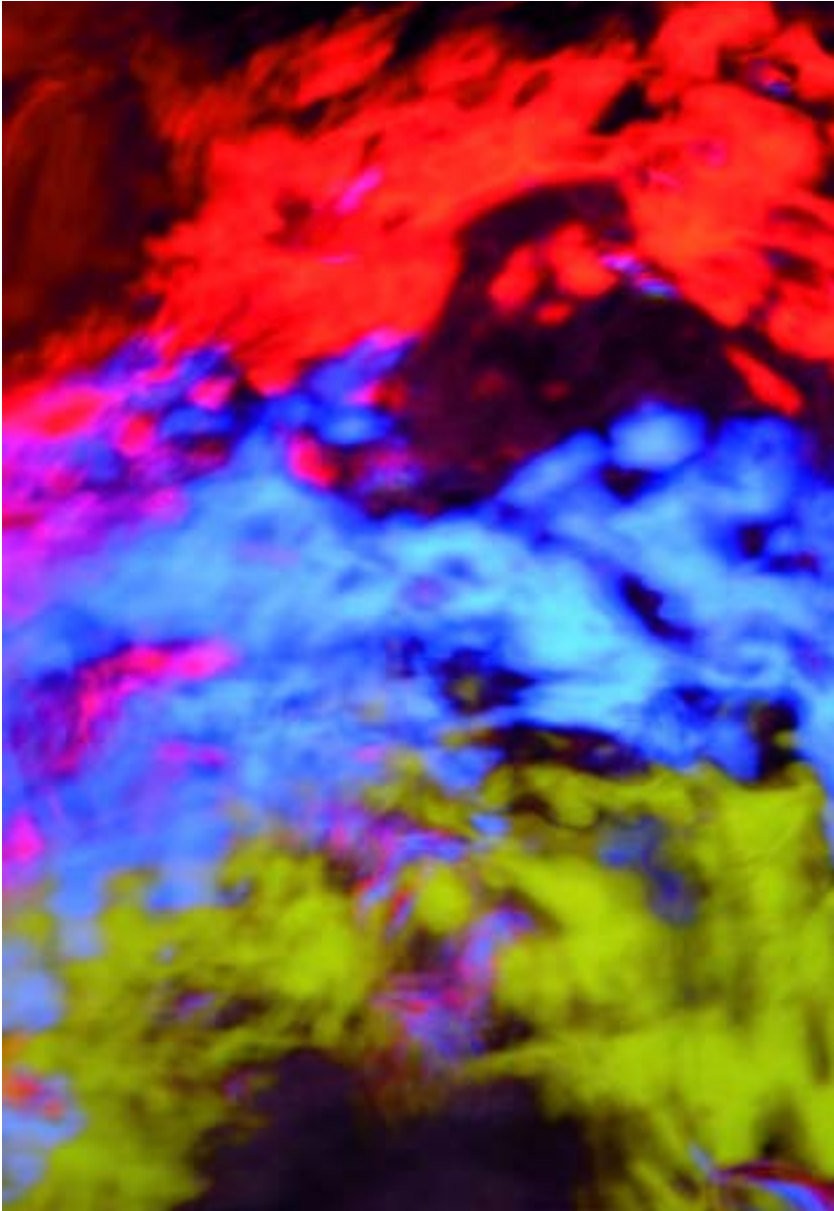


¿QUIÉNES SON LOS GRANDES PRODUCTORES DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA?

En la producción hidroeléctrica intervienen varios factores, entre los que destacan el caudal de los ríos y la accidentada orografía. Como consecuencia, en términos absolutos, los países de gran tamaño, que cuentan con largos y caudalosos ríos, suelen estar entre los principales productores mundiales. Este es el caso de Canadá, Estados Unidos, Brasil, China, Rusia e India. Pero esto no explica todo, puesto que también influyen otros factores como el grado de desarrollo, y derivados de él, la dimensión del consumo interno de electricidad y las disponibilidades de capital. Así, países de dimensión media pero bien dotados en cuanto a caudales hídricos y con un nivel de desarrollo muy alto, figuran entre los grandes productores de hidroelectricidad.

PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE HIDROELECTRICIDAD (Mtep)

	1985	1996	2004
Canadá	21,9	30,3	29,07
EE.UU.	28,5	28,8	26,32
Brasil	14,9	22,7	26,32
China	7,7	15,0	24,42
Rusia	13,7	13,2	13,59
Noruega	7,8	8,9	9,12
Japón	6,9	7,5	8,94
India	4,5	7,4	6,45
Suecia	6,1	6,4	5,50
Francia	4,3	6,0	5,25
Total Mundial	170,0	218,1	234,44



CAPÍTULO
4

CONCEPTOS BÁSICOS DE FÍSICA NUCLEAR





La radiactividad de los elementos químicos y la fisión nuclear son procesos naturales que el hombre ha logrado entender y controlar a lo largo del pasado siglo.

La radiactividad decrece con el paso del tiempo pero con una velocidad específica para cada elemento, por eso existen minerales radiactivos.

El átomo encierra en su minúsculo espacio una descomunal energía, un millón de veces superior a la de los combustibles tradicionales en su reacción de oxidación, y que se puede liberar en su fisión o aún en mayor cantidad en su fusión.

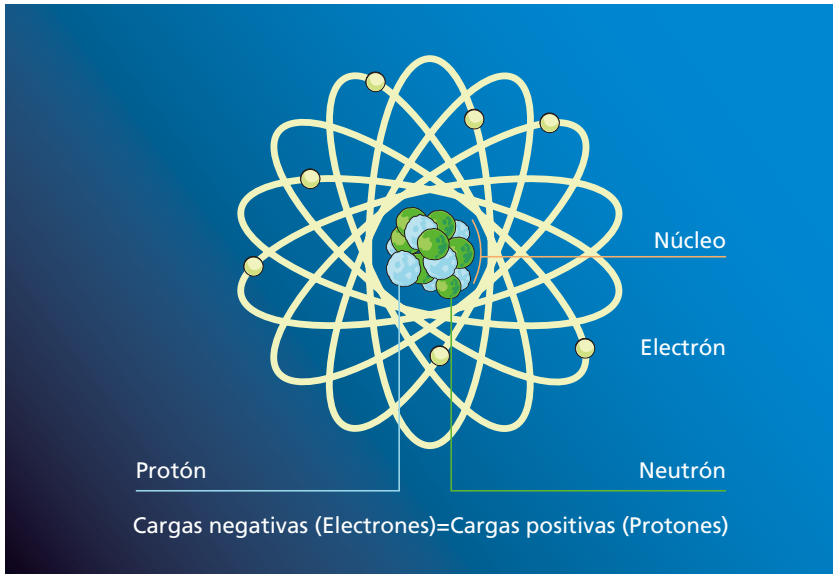
41

¿QUÉ ES UN ÁTOMO?

La teoría atómico-molecular fue establecida a principios del siglo XIX; Dalton, Avogadro y Proust fueron sus principales artífices. Según ella, la materia es discontinua, de tal modo que la menor parcela que se puede obtener de un cuerpo es una molécula. Las moléculas, a su vez, pueden dividirse en unas entidades menores denominadas átomos; las moléculas de los cuerpos simples están formadas por átomos iguales entre sí, mientras que las moléculas de los cuerpos compuestos están formadas por átomos de dos o más clases. También afirmaba esta teoría que los átomos eran indivisibles, a lo que alude su nombre (“átomos” significa “no divisible” en griego), y que todos los átomos de un mismo elemento eran iguales. Por lo tanto, podemos definir un átomo como “la parte más pequeña y eléctricamente neutra de que está compuesto un elemento químico y que puede intervenir en las reacciones químicas sin perder su integridad”. Hoy se conocen más de 109 elementos químicos distintos,

algunos de los cuales no existen en la naturaleza y se han obtenido artificialmente.

Una serie de descubrimientos que tuvieron lugar en el último tercio del siglo XIX y primer tercio del XX obligaron a revisar esta teoría atómica: la Ley periódica de Mendeleiev, las teorías sobre la ionización y la radiactividad dieron lugar a que, primero, Rutherford y, luego, Bohr y Heisenberg, establecieran el modelo atómico hoy vigente. Según este modelo el átomo no es indivisible sino que está formado por entidades más pequeñas, llamadas partículas elementales. En el átomo se pueden considerar dos partes: una central o núcleo atómico formado por protones (con carga eléctrica positiva) y neutrones, y una parte externa o corteza, formada por electrones, con carga eléctrica negativa (hay tantos electrones en la corteza como protones en el núcleo, por lo cual el átomo es eléctricamente neutro), los cuales giran alrededor del núcleo a semejanza de los planetas que giran alrededor del Sol. El radio del átomo es de unos 10^{-8} cm, y el del núcleo es de 10^{-13} cm, lo que indica que la materia está casi totalmente vacía.



Estructura de un átomo

¿QUÉ SON LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES?

Hoy sabemos que los átomos no son indivisibles sino que están formados por unas partículas subatómicas, llamadas partículas elementales. Estas se pueden definir como entes físicos más simples que el núcleo atómico, y se considera que son el último constituyente de la materia.

Las tres partículas elementales que forman parte del átomo son: el electrón, el protón y el neutrón. El electrón posee una masa de $9,11 \times 10^{-31}$ kg (aproximadamente 1/1800 de la masa del átomo de hidrógeno) y una carga negativa de $1,602 \times 10^{-19}$ C (este valor se toma como unidad en física nuclear); el protón tiene una masa de $1,673 \times 10^{-27}$ kg (aproximadamente, la masa del átomo de hidrógeno) y una carga positiva igual en valor absoluto a la carga del electrón; el neutrón tiene una masa ligeramente superior a la del protón y carece de carga eléctrica. Hoy se sabe que el protón y el neutrón no son esencialmente distintos, sino que son dos estados de una misma partícula denominada nucleón, de tal modo que un neutrón puede desintegrarse en un protón más un electrón, sin que ello signifique que el electrón existiese anteriormente sino que se forma en el momento de la desintegración. Análogamente, un protón puede transformarse en un neutrón para lo que ha de emitir un electrón positivo (positrón).

Otra partícula de gran importancia en física nuclear es el neutrino, que, aunque carece de masa y de carga, posee energía y cantidad de movimiento. La existencia del neutrino se dedujo a partir de consideraciones teóricas que hacían necesaria la existencia de esta partícula si determinados procesos subatómicos habían de cumplir las leyes de la física.

El estudio de la radiación cósmica, así como los experimentos que se llevan a cabo en los aceleradores de partículas, han permitido comprobar la existencia de un número mucho mayor de partículas elementales, todas ellas de vida efímera, es decir, que se desintegran en otras; estas partículas han recibido los nombres de muones, tauones, mesones, hiperones, etc. El número de partículas elementales descubiertas hasta la fecha rebasa el centenar.

También se sabe que además de cada partícula existe la antipartícula correspondiente, la cual posee la misma masa que ella e igual carga pero de signo contrario. Así, el antiprotón es una partícula con la misma masa que el protón pero cuya carga es una unidad negativa; el antielectrón (que recibe el nombre de positrón) es igual que un electrón con carga positiva. Las antipartículas tienen una vida muy corta, ya que cuando se encuentran con una partícula se aniquilan liberando energía.

43

¿QUÉ SON LOS ISÓTOPOS?

Una especie atómica viene definida por dos números enteros: el número de protones que hay en el núcleo y el número total de protones más neutrones. El primero, llamado número atómico, Z , define el elemento químico al que pertenece el átomo; es decir, independientemente del número de neutrones que posean, todos los átomos cuyos núcleos tienen un protón son átomos de hidrógeno, todos los que tienen ocho protones son átomos de oxígeno, etc. El segundo número, denominado número másico, A , es el número entero más próximo a la masa (expresada en unidades de masa atómica) del átomo en cuestión; es decir, todos los átomos con A igual a 2 tienen una masa de, aproximadamente, 2 unidades másicas; los que tienen $A = 235$, tienen una masa de unas 235 unidades de masa atómica.

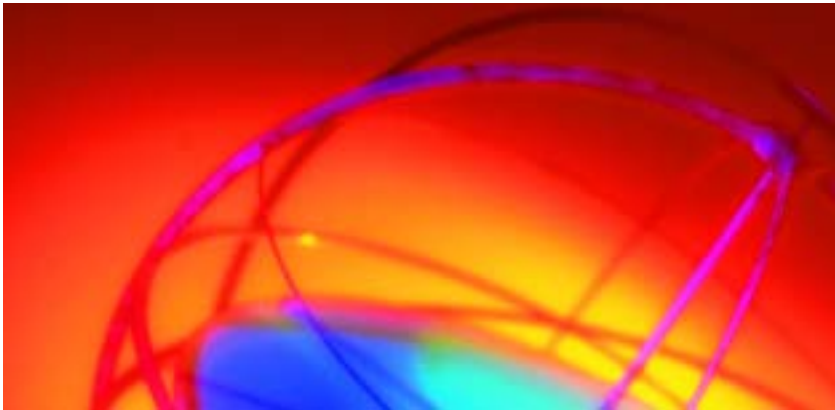
Ocurre que existen varias especies atómicas (o clases de átomos) que tienen el mismo número atómico pero poseen números másicos distintos. Esto significa que dentro de cada elemento químico existen varias especies atómicas que difieren en su masa atómica. Estas especies de un mismo elemento se llaman isótopos, nombre que alude (isos: igual; topos: lugar) a que estos átomos ocupan el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos. Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos: el isótopo con $A=1$, denominado protio (que carece de neutrones); el isótopo con $A=2$, llamado deuterio (que posee 1 neutrón); y el isótopo con $A=3$, denominado tritio (que posee 2 neutrones).

¿NUCLEIDO E ISÓTOPO SON CONCEPTOS EQUIVALENTES?

Sí. Nucleido es el nombre genérico que se aplica a todos los átomos que poseen el mismo número atómico y el mismo número másico. Simbólicamente cada nucleido se representa por A_ZM , donde M es el símbolo del elemento químico al que pertenece, y A y Z son sus números másico y atómico, respectivamente.

Dos nucleidos que difieren en el número másico pero tienen un mismo número atómico son “especies” de un mismo elemento químico. Se dice que estos dos nucleidos son isótopos de dicho elemento. De acuerdo con estas definiciones nucleido se refiere a considerar cada especie por sí misma, mientras que el concepto isótopo implica una relación de comparación.

Ahora bien, en la práctica se suele olvidar esta distinción semántica tan sutil entre ambos vocablos, y, aunque no sea riguroso, es moneda corriente el empleo de isótopo como sinónimo de nucleido, aunque no al contrario. En esta obra, y por mor de seguir el uso, emplearemos isótopo con los dos significados: isótopo “strictu sensu” y nucleido.



¿QUÉ ES LA RADIATIVIDAD?

La radiactividad fue descubierta por el científico francés Antoine Henri Becquerel en 1896. El descubrimiento tuvo lugar de una forma casi ocasional: Becquerel realizaba investigaciones sobre la fluorescencia del sulfato doble de uranio y potasio y descubrió que el uranio emitía espontáneamente una radiación misteriosa. Esta propiedad del uranio —después se veía que hay otros elementos que la poseen— de emitir radiaciones, sin ser excitado previamente, recibió el nombre de radiactividad.

El descubrimiento dio lugar a un gran número de investigaciones sobre el tema. Quizás las más importantes en lo referente a la caracterización de otras sustancias radiactivas fueron las realizadas por el matrimonio, también francés, Pierre y Marie Curie, quienes descubrieron el polonio y el radio, ambos en 1898.

La naturaleza de la radiación emitida y el fenómeno de la radiactividad fueron estudiados en Inglaterra por Ernest Rutherford, principalmente, y por Frederick Soddy. Como resultado pronto se supo que la radiación emitida podía ser de tres clases distintas, a las que se llamó alfa, beta y gamma, y que al final del proceso el átomo radiactivo original se había transformado en un átomo de naturaleza distinta, es decir, había tenido lugar una transmutación de una especie atómica en otra distinta. También se dice (y esta es la terminología actual) que el átomo radiactivo ha experimentado una desintegración.

Hoy sabemos que la radiactividad es una reacción nuclear de “descomposición espontánea”; es decir, un nucleido inestable se descompone en otro más estable que él, a la vez que emite una “radiación”. El nucleido hijo (el que resulta de la desintegración) puede no ser estable, y entonces se desintegra en un tercero, el cual puede continuar el proceso, hasta que finalmente se llega a un nucleido estable. Se dice que los sucesivos nucleidos de un conjunto de desintegraciones forman una serie radiactiva o familia radiactiva.

Digamos, por último, que son radiactivos todos los isótopos de los elementos con número atómico igual o mayor a 84 (el polonio es el primero de ellos), y que hoy se obtienen en el laboratorio isótopos radiactivos de elementos cuyos isótopos naturales son estables; es la llamada radiactividad artificial. La primera obtención en el laboratorio de un isótopo artificial radiactivo (es decir, el descubrimiento de la radiactividad artificial) la llevó a cabo en 1934 el matrimonio formado por Frédéric Joliot e Irene Curie, hija de los esposos Curie.

46

¿QUÉ TIPOS HAY DE DESINTEGRACIONES RADIATIVAS?

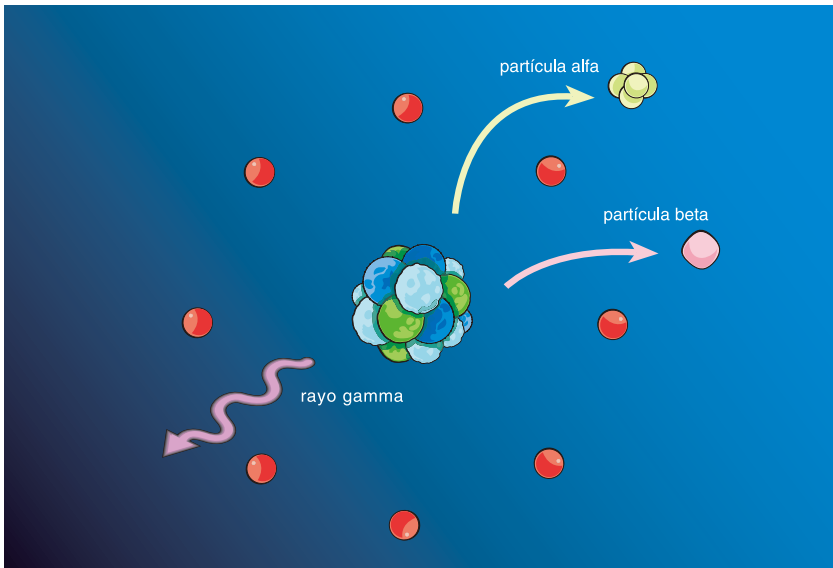
Al estudiar el fenómeno de la radiactividad, Rutherford descubrió que la radiación emitida por una desintegración radiactiva podía ser de tres clases: alfa, beta, y gamma; además también hay que considerar hoy la emisión de neutrones.

- La radiación alfa (α) está formada por núcleos del isótopo 4 del helio, es decir, está constituida por una radiación corpuscular, en la que cada corpúsculo está formado por dos protones y dos neutrones. Ello significa que tiene una masa atómica de 4 unidades y una carga eléctrica de 2 unidades positivas. Estos protones y neutrones formaban antes parte del núcleo que se ha desintegrado.
- La radiación beta (β) está constituida por electrones, lo que significa que es también de naturaleza corpuscular, en la que cada corpúsculo tiene una masa atómica de $1/1800$, aproximadamente, y una carga de 1 unidad negativa. A diferencia del caso anterior, el electrón emergente no existía anteriormente en el núcleo sino que procede de la transformación de un neutrón en un protón, que queda dentro del núcleo, y el electrón, que es eyectado. Posteriormente se descubrió la radiación beta positiva, semejante a la beta pero con carga positiva. Está formada por positrones procedentes de la transformación de un protón en un neutrón.

- La radiación gamma (γ) es de naturaleza electromagnética, semejante a la luz ordinaria o a la radiación X, pero con mucho menor longitud de onda. Es, por lo tanto, de naturaleza ondulatoria, carente de masa en reposo y de carga. Esta radiación tampoco existía antes en el núcleo, sino que es energía que se emite como consecuencia de un reajuste energético del núcleo.
- En la fisión (descomposición de un núcleo inestable en dos núcleos de inferior número atómico) espontánea, así como en la fisión inducida y en otras reacciones nucleares, se produce una radiación de neutrones, formada por estas partículas, con masa, por lo tanto, de 1 unidad de masa atómica y sin carga.

Las leyes que rigen los distintos tipos de desintegración fueron descubiertas por Soddy y Fajans. Estas leyes son:

- En la desintegración alfa, puesto que se emiten dos protones y dos neutrones, el nucleido hijo tiene dos protones menos que el padre, lo



Tipos de desintegración radiactiva

- que significa que ha retrocedido dos puestos en el sistema periódico y su masa ha disminuido en cuatro unidades.
- En la desintegración beta negativa, ya que un neutrón se transforma en un protón, el átomo hijo tiene un protón más que el padre, lo que representa que avanza un puesto en el sistema periódico, y no varía su masa atómica.
 - La emisión gamma no constituye una desintegración propia sino que se produce acompañando a las radiaciones alfa o beta, en las desintegraciones de este tipo, o en la desexcitación de nucleidos que se encontraban en un nivel energético superior al normal de ese nucleido (nucleidos excitados).
 - En la desintegración con emisión de un neutrón, el nucleido hijo es un isótopo del padre, y posee una masa menor en una unidad.

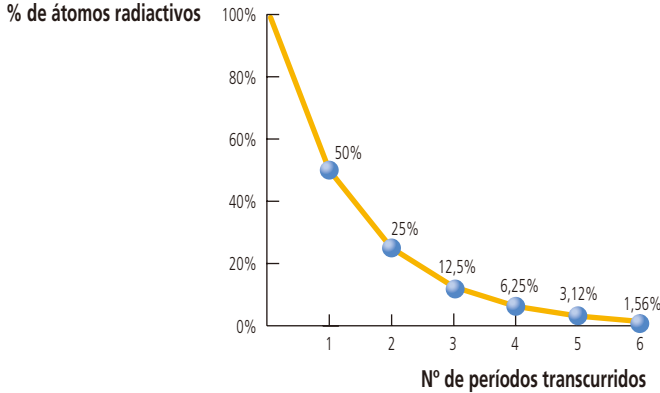
47

¿QUÉ LEY RIGE EL PROCESO DE UNA DESINTEGRACIÓN RADIATIVA?

La desintegración de un cuerpo radiactivo es un proceso estadístico; ello quiere decir que si consideramos un determinado átomo radiactivo no podemos conocer en qué momento tendrá lugar su desintegración, pero si tomamos un número muy grande de átomos de un mismo nucleido, podemos conocer la ley que, como promedio, sigue el conjunto en su desintegración.

Se demuestra que la probabilidad de que se desintegre un átomo radiactivo permanece constante a lo largo del tiempo. Ello se traduce en que al desintegrarse una sustancia radiactiva la cantidad de ella que no se ha desintegrado disminuye exponencialmente con el tiempo. Se llama período de semidesintegración, T , al tiempo que ha de transcurrir para que la cantidad de sustancia radiactiva se haya reducido a la mitad. El valor de T puede variar entre fracciones muy pequeñas de segundo (isótopos de vida corta) a millones de años (isótopos de vida larga). La ley matemática

que recoge la desintegración radiactiva es $N=N_0 e^{-\lambda t}$, siendo N_0 la masa inicial del radionucleido existente, λ la constante de desintegración específica para cada elemento y t , el tiempo transcurrido. El período de semi-desintegración T está relacionado con la constante de desintegración λ mediante la fórmula $T= 0,693/\lambda$.



48

¿QUÉ SON LAS RADIACIONES IONIZANTES?

El término radiación se emplea genéricamente para designar la energía electromagnética o las partículas materiales que, a partir de un foco emisor, se propagan en el espacio. Esta propagación, en ausencia de campos que influyan sobre la radiación, es rectilínea (en forma de “rayos”, a lo cual alude el nombre).

Determinadas radiaciones son capaces de producir iones (partículas cargadas, por ejemplo, por arranque de electrones de sus átomos) a su paso por la materia, por lo que reciben el nombre genérico de radiaciones ionizantes: en unos casos la radiación está formada por partículas cargadas que poseen energía cinética suficiente para producir iones en su colisión

con los átomos que encuentran a su paso (se las llama, por eso, radiaciones directamente ionizantes); en otros casos la radiación está formada por partículas no cargadas que pueden dar lugar en la materia a la liberación de partículas directamente ionizantes, por lo que reciben el nombre de radiaciones indirectamente ionizantes.

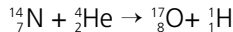
Las principales radiaciones ionizantes, son: las radiaciones alfa, beta, y gamma, los rayos X y los neutrones. De ellas, las dos primeras son radiaciones directamente ionizantes, y las demás son indirectamente ionizantes.

49

¿QUÉ SON LAS REACCIONES NUCLEARES?

Por analogía con las reacciones químicas, se llaman reacciones nucleares las interacciones entre núcleos atómicos o entre núcleos atómicos y partículas elementales; por extensión, se incluyen también las interacciones entre partículas elementales.

La primera reacción nuclear llevada a cabo en el laboratorio la realizó Rutherford, en 1919, bombardeando el isótopo 14 del nitrógeno con partículas alfa. En la reacción se producen el isótopo 17 del oxígeno y un protón. Simbólicamente se representa por la ecuación:

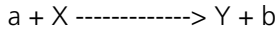


Al igual que en química se considera que la descomposición espontánea de una molécula inestable es la reacción química más simple (reacción monomolecular), la radiactividad es el tipo más simple de reacción nuclear, y es la que se descubrió primero.

En los demás tipos de reacciones nucleares hay, en general, dos núcleos o partículas que reaccionan, para dar lugar a productos de reacción. A semejanza de lo que ocurre en una reacción química, para producir una reacción nuclear normalmente es necesario comunicar al sistema inicial una energía de activación. En la reacción se libera energía, que se manifiesta en forma de energía cinética de los productos de la reacción, acompañada en ocasiones por la producción de radiación gamma.

¿CÓMO SE REALIZA UNA REACCIÓN NUCLEAR?

Una reacción nuclear puede representarse esquemáticamente en la forma:



donde X e Y son los núcleos inicial y final, "a" es la partícula empleada como proyectil y "b" la partícula emergente. Para que ocurra la reacción es necesario que la partícula "a" tenga una energía suficiente para producirla. En las primeras reacciones nucleares realizadas en el laboratorio se emplearon como proyectiles partículas procedentes de una desintegración radiactiva. Más adelante se construyeron los llamados aceleradores de partículas, donde la energía necesaria se obtiene mediante la acción de campos eléctricos o magnéticos.

Un criterio ampliamente usado para clasificar las reacciones nucleares consiste en definir las sobre la base de las dos partículas incidente y emergente, "a y b". Así, se habla de reacciones (n, p) en las que la partícula incidente es un neutrón y la emergente un protón, etc.

Cuando no existían aún los aceleradores, se utilizaba como proyectil la radiación alfa de una desintegración radiactiva; los trabajos de Rutherford en los primeros decenios del siglo XX se centraron en este tipo de reacciones. La construcción de aceleradores de partículas permitió el empleo de otros proyectiles cargados, principalmente protones. En 1934 el físico italiano Enrico



Fermi concibió la idea de emplear el neutrón (que como partícula eléctricamente neutra no tiene que vencer la repulsión del núcleo) como proyectil y el grupo de investigadores dirigido por él estudió sistemáticamente las reacciones entre neutrones y los diversos elementos de la tabla periódica. Fermi descubrió que la probabilidad de interacción de los neutrones con los núcleos era mayor cuando los neutrones tenían bajas energías (estaban “moderados”), incluso a energías correspondientes a la temperatura ambiente (neutrones térmicos). En una de estas reacciones, la que tiene lugar entre el uranio-235 y el neutrón, en los últimos días de 1938 Otto Hahn descubrió la fisión.

Entre los tipos más importantes de reacciones nucleares debemos citar:

- Dispersión: en ellas la partícula es de la misma naturaleza que el proyectil. Todo ocurre como si éste hubiese rebotado contra el blanco, aunque nadie podría asegurar que la partícula emergente sea la misma que incidió. Cuando la energía cinética total de los productos originales es igual a la de los productos finales de la reacción se dice que se trata de una dispersión elástica. Si, por el contrario, la energía cinética total de los productos de reacción es menor que la inicial, diremos que es una dispersión inelástica. En este caso, la diferencia entre ambas energías es absorbida por el blanco, el cual queda excitado.
- Captura: en esta reacción la partícula incidente es absorbida por el blanco sin que se produzca ninguna partícula emergente, con la excepción de fotones gamma.
- Fisión: en este tipo de reacción, un núcleo pesado se rompe en, generalmente, dos fragmentos cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, lo que va acompañado de una emisión de neutrones y radiación gamma, con la liberación de una gran cantidad de energía (en forma de energía cinética de los fragmentos y de los neutrones y las radiaciones producidas). Aunque existen casos de fisión espontánea o de fisión por captura de un fotón, la reacción se produce normalmente por la captura de un neutrón.
- Espalación: es una reacción originada por una partícula de alta energía (por ejemplo un protón de 1 GeV) en un núcleo pesado, como uranio o plomo. En la reacción se arrancan varios neutrones. Una partícula muy energética provoca espalación en varios núcleos consecutivamente y es posible que aparezcan 40 neutrones o más por cada protón de 1 GeV. Esta reacción está relacionada con los aceleradores de partículas.

- Fusión nuclear: es una reacción entre dos núcleos de átomos ligeros en la que se produce un núcleo de un átomo más pesado, unido a la liberación de partículas elementales y de una gran cantidad de energía. La energía liberada en el Sol y en las estrellas proviene de reacciones de fusión nuclear.

51

¿QUÉ ES UNA REACCIÓN DE FISIÓN NUCLEAR EN CADENA?

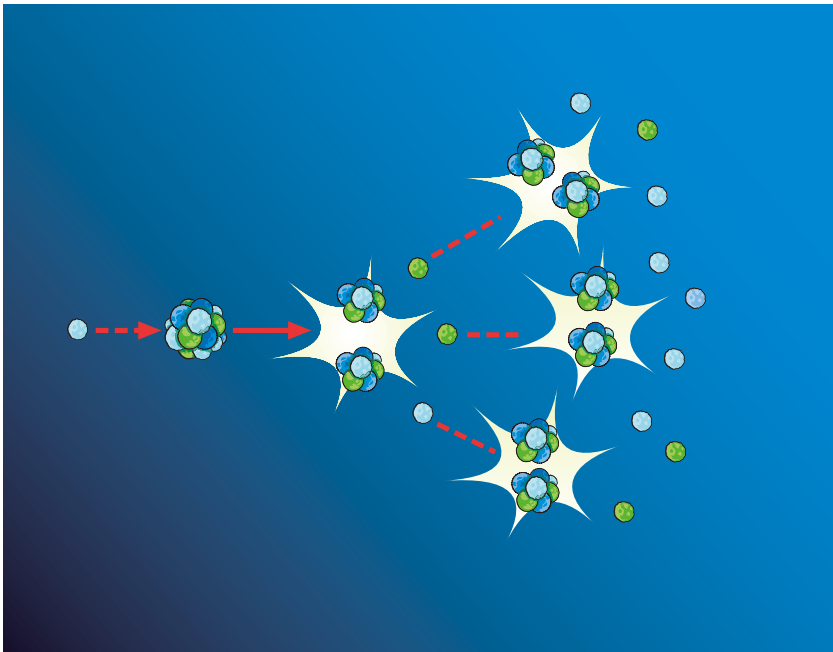
La fisión nuclear es una reacción que se produce mediante el bombardeo con neutrones de determinados nucleidos, denominados nucleidos fisionables. En la fisión acontece que al romperse el núcleo blanco se liberan varios neutrones (dos o tres) con una energía igual o superior a la de los neutrones incidentes, lo que permite que los neutrones producidos den lugar a nuevas fisiones, y los liberados en ellas a otras nuevas, etc. Con ello se puede conseguir que una vez iniciada la reacción no sea necesario continuar con el bombardeo de neutrones externos, sino que la reacción se mantenga por sí misma.

Cuando una vez iniciada una reacción es capaz de mantenerse por sí sola se dice que se trata de una reacción en cadena. Según esta definición, una reacción de fisión nuclear en cadena es un proceso de fisiones nucleares sucesivas en las que todos o parte de los neutrones liberados en cada fisión originan nuevas fisiones, y así sucesivamente.

Para conocer en qué condiciones puede tener lugar la reacción de fisión nuclear en cadena, es preciso estudiar las vicisitudes que siguen los neutrones producidos en la fisión. La reacción de un neutrón con un núcleo de uranio 235 da lugar, la mayor parte de las veces, a su fisión, proceso en el que como promedio se liberan 2,5 neutrones. Una parte de los neutrones producidos dará lugar a nuevas fisiones; otra parte será absorbida por núcleos de otros elementos presentes en el sistema, sin dar lugar a fisiones; una última parte escapará al exterior, sin que tampoco origine nuevas fisiones. Si el número de neutrones del primer grupo es igual a la unidad se habrá obtenido una reacción autosostenida y con un número constante de fi-

siones por unidad de tiempo, ya que cada neutrón que produjo inicialmente una fisión dará lugar a otro neutrón útil para continuar el proceso. Se dice, entonces, que el sistema forma un conjunto crítico. Si el número de neutrones útiles para producir nuevas fisiones fuera mayor que la unidad, el número de fisiones por unidad de tiempo sería creciente y tendríamos un conjunto hipercrítico. Si, por el contrario, fuera menor que la unidad, la reacción decrecería con el tiempo y acabaría deteniéndose; el conjunto recibe el nombre de subcrítico.

Un conjunto será crítico, hipercrítico o subcrítico dependiendo de la proporción relativa de neutrones en cada uno de los tres grupos, lo que es función de la concentración de átomos de U-235 en el medio, de la concentración y naturaleza de los restantes nucleidos presentes, y de la relación entre volumen y superficie del medio donde tiene lugar la reacción.



Esquema de una reacción de fisión nuclear en cadena

52

¿DÓNDE RESIDE EL INTERÉS PRÁCTICO DE LA FISIÓN?

El hecho de que la fisión pueda dar lugar a una reacción de fisión nuclear en cadena permite que, una vez iniciada ésta, se mantenga por sí misma, lo que significa que puede obtenerse una producción de energía en régimen estacionario. La consecuencia práctica es que la fisión es una reacción nuclear que puede servir como fuente de energía para cubrir necesidades energéticas de la sociedad. Esto es semejante, en un proceso nuclear, a lo que ocurre con las reacciones químicas de combustión, que también sirven como fuentes de energía porque una vez iniciada la combustión del carbón o del petróleo, la reacción se mantiene por sí misma sin necesidad de ninguna acción exterior. El interés principal de la fisión es su alto rendimiento energético. Un gramo de uranio-235 fisionado totalmente produciría una energía de 1 MWd (megavatio-día=24.000 kilovatios-hora), lo mismo que la combustión de 2,1 tep.

53

¿QUÉ SE ENTIENDE POR COMBUSTIBLE NUCLEAR?

Se llama combustible nuclear cualquier material que contiene nucleidos fisionables y puede emplearse en un reactor para que en él se desarrolle una reacción nuclear en cadena.

Según esto el uranio es un combustible nuclear, como también lo es el óxido de uranio. En el primer caso nos referimos a un elemento químico, alguno de cuyos isótopos es fisionable; en el segundo, a un compuesto químico determinado que contiene tales isótopos.

Entendemos por isótopos fisionables aquellos nucleidos susceptibles de experimentar fisión. Para hablar con precisión, sería necesario especificar la energía de los neutrones que pueden hacer fisionar dicho isótopo; por ejemplo, el U-238 no es fisionable por los neutrones térmicos, pero sí por los rápidos, aunque con pequeña probabilidad (sección eficaz). Normalmente, y a no ser que se hagan mayores precisiones, suele entenderse por isótopo fisionable cualquier nucleido que fisiona tanto por la acción de los neutrones térmicos como de los rápidos.

El único isótopo fisionable que existe en la naturaleza es el uranio-235. Se encuentra en una proporción del 0,711% en el uranio natural.



Mineral de uranio

Hay otros isótopos fisionables que no existen en la naturaleza pero que pueden obtenerse artificialmente. Los principales son:

- El uranio-233, que se obtiene por captura de un neutrón por un núcleo de torio-232. El núcleo intermedio formado sufre dos desintegraciones beta, dando lugar al mencionado U-233. El torio es un mineral abundante en la Tierra en cantidad parecida al plomo y molibdeno, ocupando el puesto 39 en esta relación de abundancia terrestre y siendo mayor que la del uranio.
- El plutonio-239. Aunque han podido detectarse trazas de él, se considera que no es un isótopo natural. Se forma en la captura de un neutrón por un núcleo de U-238, seguida por dos emisiones beta. El plutonio es un elemento que no existe en estado libre en la corteza terrestre pues su período de semidesintegración es muy inferior al del uranio-238 y al del torio-232, así como al tiempo transcurrido desde la formación de la Tierra.
- Menor importancia que los anteriores tiene el plutonio-241. Se forma por captura de un neutrón en el Pu-240, el cual procede, a su vez, de la captura de un neutrón por un núcleo de Pu-239.

54

¿QUÉ SE ENTIENDE POR MATERIAL FÉRTIL?

Existen determinados nucleidos de elementos de elevado peso atómico que reaccionan con los neutrones, capturando éstos y emitiendo después partículas beta, con la circunstancia de que el nucleido final es fisionable. Dichos nucleidos iniciales, no fisionables con neutrones térmicos, son de un gran interés práctico, puesto que si se introducen dentro de un reactor nuclear sirven de materia prima para la obtención de combustible nuclear. Reciben el nombre de nucleidos fértiles y el material que los contiene el de material fértil.

El torio-232 y el uranio-238 son los dos isótopos fértiles más importantes. Por lo tanto el torio y el uranio natural o empobrecido son los dos materiales fértiles de mayor interés técnico.

55

¿DÓNDE RADICA EL INTERÉS PRÁCTICO DE LA FUSIÓN NUCLEAR?

El interés práctico de la fusión nuclear se encuentra en la cantidad de energía obtenida y en la abundancia de los elementos atómicos empleados, lo que le da el carácter de energía inagotable.

En las reacciones nucleares de fusión se emplean elementos atómicos ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos: el deuterio y el tritio. El deuterio abunda en el agua del mar en una proporción de un átomo por cada 6.500 de hidrógeno. Como además, tres cuartas partes del planeta están cubiertas por agua, se puede afirmar que las reservas son inagotables. El tritio, aunque es escaso en la naturaleza, se puede generar mediante reacciones nucleares de neutrones con los dos isótopos del litio, material, por otro lado, abundante en la corteza terrestre (20 ppm) y en el agua del mar (0,17 ppm).

Desde el punto de vista energético, por la fusión del deuterio contenido en un litro de agua, se obtiene una energía equivalente a la producida en la combustión de 300 litros de gasolina.

56

¿CUÁL ES LA SITUACIÓN ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE FUSIÓN NUCLEAR?

La fusión nuclear se encuentra en un estado de desarrollo tal que hasta la fecha no se ha demostrado su factibilidad científica: es decir, la energía gastada para producir las reacciones de fusión no se ha podido recuperar en su totalidad.

Se trata de reproducir en la Tierra las condiciones en las que los isótopos del hidrógeno experimentan fusiones en el Sol. Al no poder lograr en la

Tierra la gran presión gravitatoria existente en el Sol, hay que recurrir a muy altas temperaturas, en las que estos isótopos (deuterio y tritio) están totalmente ionizados, en estado llamado de "plasma". A esas temperaturas, el plasma no puede confinarse con materiales metálicos ni cerámicos, por lo que hay que utilizar otros métodos de confinamiento. Se han desarrollado dos líneas de trabajo científico: *el confinamiento magnético y el inercial*.

En la *fusión por confinamiento magnético* se emplean campos magnéticos para hacer que las partículas del plasma se aceleren en trayectorias alrededor de las líneas del campo magnético, y así puedan reaccionar con mayor facilidad. Actualmente existen varias máquinas que funcionan bajo el concepto Tokamak. Los resultados más notables conseguidos hasta ahora se lograron en la máquina JET en noviembre de 1991, al obtener una potencia de 1,7 MW y posteriormente, en 1993, el TFTR llegó hasta los 6 MW alcanzando temperaturas de 30 millones de °C.

El proyecto más avanzado de confinamiento magnético es el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), prototipo basado en el concepto Tokamak, y en el que se espera alcanzar una ganancia energética superior a la unidad. Se trata de un proyecto multinacional de gran coste y largo período de gestación. Se ha acordado que este proyecto se desarrolle en Cadarache (Francia).



En la *fusión por confinamiento inercial* se emplea un láser o un haz de partículas para suministrar la energía instantánea necesaria para la fusión de pequeñas partículas de deuterio y tritio. En la actualidad se dispone de láseres que tienen una energía de varias decenas de kilojulios. Para alcanzar la factibilidad científica será necesario incrementar su energía en un factor 10. En este sentido, en el laboratorio de Livermore, en Estados Unidos, se ha comenzado el diseño y construcción de una instalación: NIF (National Ignition Facility) con una energía entre 1,8 y 2,2 MJ. Paralelamente Francia está realizando un proyecto similar: el "Láser Megajoule", que con una energía entre 1,8 y 3,2 MJ se instalará en Burdeos.



CAPÍTULO
5

CONCEPTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA





La vida inunda el planeta Tierra, un cuerpo celeste radiactivo de 4.500 millones de años de antigüedad, donde el ser humano que lo habita recibe una dosis de origen natural de 2 a 10 milisievert. El mismo cuerpo humano emite radiación por el potasio-40 que lo constituye. Las actividades industriales y las médicas incrementan en un 10% esa dosis.

Sabemos trabajar con sustancias radiactivas y protegernos de sus radiaciones. Debemos cumplir escrupulosamente la normativa establecida e interponer las barreras adecuadas de blindaje.

En España existe una estricta legislación y reglamentación de las actividades nucleares y radiactivas que son controladas y supervisadas por un Organismo independiente que responde al Parlamento, el Consejo de Seguridad Nuclear, en un marco legal y democrático.

57

¿A QUÉ RADIACIONES IONIZANTES ESTÁ EXPUESTO EL SER HUMANO?

Las personas están expuestas continuamente a radiaciones ionizantes, y lo han estado desde los albores de la humanidad. De estas radiaciones, unas proceden de la propia naturaleza, sin que el hombre haya intervenido en su producción; otras están originadas por acciones ocasionadas por el hombre.

Las primeras constituyen el fondo radiactivo natural. Podemos distinguir tres causas de este fondo radiactivo:

- Las radiaciones ionizantes procedentes del espacio exterior (radiación cósmica). Están originadas por los procesos nucleares que tienen lugar en el exterior de la Tierra. Puesto que la atmósfera absorbe parcialmente las radiaciones, el fondo natural debido a esta causa varía con la altitud de tal modo que es menor al nivel del mar que en lo alto de una montaña.
- Las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas presentes en la corteza terrestre. Esta componente del fondo radiactivo varía notablemente entre unos y otros puntos de la Tierra, ya que no es uniforme la distribución de los elementos químicos. Por ejemplo, el fondo radiactivo terrestre de las sierras de Guadarrama y de Gredos, cuyas rocas graníticas poseen una radiactividad relativamente alta, es mucho mayor que el correspondiente a las zonas de naturaleza calcárea.



– La radiación de los isótopos radiactivos contenidos en el propio organismo humano, principalmente isótopos del carbono y del potasio. A ella hay que unir la radiación producida por el radón que inhalamos al respirar, el cual procede de la desintegración del radio y el torio.

Como promedio, el 15% de la dosis procedente del fondo natural que recibe una persona en España se debe a la radiación cósmica; el 20% a la radiación terrestre, el 15% al propio organismo y el 50% al radón.

Las causas artificiales de radiación se deben a la exposición a diversas fuentes de origen no natural, como son las exploraciones radiológicas con fines médicos, las esferas luminosas de relojes, la televisión en color, los viajes en avión (en este caso se debe a la mayor dosis de radiación cósmica que se recibe durante el vuelo a gran altura), el poso radiactivo procedente de las explosiones nucleares en la atmósfera que tuvieron lugar en el pasado, las emisiones de las centrales térmicas de carbón, cuyos humos contienen isótopos radiactivos; y las instalaciones nucleares.

Dentro de las causas artificiales la principal fuente de irradiación es la proveniente de las exploraciones radiológicas, que en los países desarrollados dan lugar a unas dosis sobre la población semejantes a la radiación cósmica. Las centrales nucleares producen una dosis prácticamente nula sobre el público en general y una dosis muy pequeña y controlada sobre el personal de una central.

58

¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES MAGNITUDES QUE SE EMPLEAN EN RADIOLOGÍA?

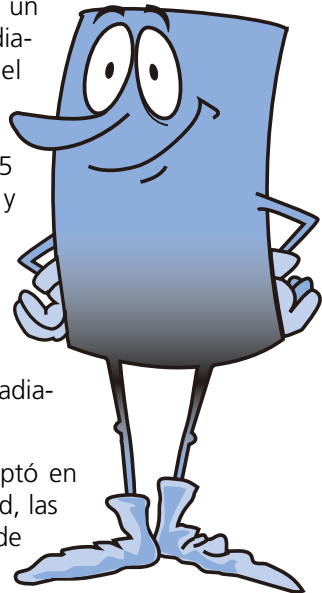
En un material radiactivo es necesario definir de alguna forma la “intensidad” con la que se desintegra. Se emplea para ello la magnitud denominada actividad, que expresa el número de desintegraciones que tienen lugar en el material durante la unidad de tiempo. En el Sistema Internacional de unidades (SI), la unidad de actividad es el becquerel, cuyo

símbolo es Bq, y que se define como la actividad de un material que experimenta una desintegración por segundo.

Como la desintegración de un cuerpo radiactivo decrece en forma exponencial con el transcurso del tiempo, su actividad no permanece constante sino que sigue esta misma evolución, más lenta o más rápida según se trate de un isótopo de vida larga o corta.

Para estudiar las acciones de la radiación sobre un objeto sometido a ella se ha definido la magnitud dosis absorbida (en lugar de la expresión completa, acostumbra a emplearse su elipsis, dosis), que se define como la energía que transfiere la radiación a la unidad de masa del material irradiado. La unidad de dosis absorbida en el sistema SI es el gray, cuyo símbolo es Gy. Se define como la dosis de radiación que transfiere una energía de 1 julio a 1 kilogramo masa de material irradiado.

En el estudio sobre los efectos biológicos de las radiaciones se observa que tales efectos no dependen sólo de la dosis absorbida sino del tipo de radiación empleado, es decir, dosis iguales de dos radiaciones diferentes producen unos efectos biológicos distintos. Para tener en cuenta esto se define una nueva magnitud, la dosis equivalente, que es el producto de la dosis absorbida por un factor de ponderación para cada tipo de radiación, con objeto de homogeneizar, desde el punto de vista de sus efectos biológicos, las distintas clases de radiación. Este factor es 1 para las radiaciones X, gamma y beta; entre 5 y 20 para los neutrones, 5 para los protones, y 20 para la radiación alfa y otras partículas con varias cargas. La unidad de dosis equivalente en el sistema SI es el sievert cuyo símbolo es Sv. Se define como la dosis absorbida de cualquier radiación que produce los mismos efectos biológicos que 1 Gy de radiación gamma.



El Sistema Internacional de unidades se adoptó en fecha relativamente reciente. Con anterioridad, las magnitudes radiológicas se medían dentro de un sistema especial de unidades denomina-

do sistema radiológico. Es frecuente el encontrar publicaciones que siguen utilizando las unidades de este sistema. Por ello, a continuación se exponen las correspondencias entre las unidades del Sistema Internacional y las del radiológico.

UNIDADES DE LAS MAGNITUDES RADIOLÓGICAS EN LOS SISTEMAS SI Y RADIOLÓGICO

<i>Magnitud</i>	<i>Unidad y símbolo (SI)</i>	<i>Unidad y símbolo (sistema radiológico)</i>	<i>Equivalencia</i>
Actividad	becquerel - Bq	curio - Ci	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq
Dosis absorbida	gray - Gy	rad - rad ó rd	1 rad = 10^{-2} Gy
Dosis equivalente	sievert - Sv	rem - rem	1 rem = 10^{-2} Sv

El sistema radiológico definía además una magnitud denominada exposición, que se empleó para medir la capacidad de la radiación para producir iones en el aire; su unidad era el roentgen (símbolo R). Esta magnitud ha caído en desuso, por lo que su unidad en el SI (el culombio/kilogramo) carece de nombre. La equivalencia es: $1R = 2,54 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.

59

ENTRE LAS MAGNITUDES RADIOLÓGICAS, ¿CUÁLES SON LAS MÁS SIGNIFICATIVAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?

La protección radiológica se define como el conjunto de medios que se emplean para conseguir la protección sanitaria, tanto de la población en general como de los trabajadores profesionalmente expuestos en actividades relacionadas con las radiaciones ionizantes, con objeto de evitar los daños que producirían estas radiaciones si las dosis recibidas fueran lo suficientemente elevadas.

Entre las magnitudes radiológicas citadas, la dosis equivalente está relacionada directamente con los efectos biológicos de la radiación, por lo que debe considerarse como la más importante desde el punto de vista de la protección radiológica. La reglamentación se refiere, normalmente, a dicha magnitud cuando establece los límites admisibles de radiación que se puede recibir.

Al referirse a los efectos de la radiación sobre un organismo vivo no solamente hay que considerar la dosis equivalente, sino cual es el órgano que la recibe, ya que no es lo mismo irradiar uno u otro órgano del cuerpo o irradiar el organismo entero. Para ello, se emplea el concepto de dosis efectiva, con objeto de establecer valores del riesgo que sean independientes de si la totalidad del organismo se ha irradiado en forma uniforme o, por el contrario, no ha existido tal uniformidad. Esta dosis es la suma ponderada de las dosis equivalentes recibidas por cada uno de los tejidos, según adecuados factores de ponderación. Se mide en Sv.

Hay que tener en cuenta que las sucesivas dosis absorbidas por una persona a lo largo del tiempo se suman en lo que se refiere a sus efectos. Por ello, la reglamentación habla de dosis comprometida como suma de todas las dosis recibidas por una persona a lo largo de su vida hasta el momento que se considere. Este criterio de acumulación de dosis es conservador —como todos los que se aplican en protección radiológica— ya que en él se prescinde de la posibilidad de que el organismo se recupere parcialmente de las dosis absorbidas en un pasado lejano. Se mide en Sv·año.

Por último, se define la dosis colectiva que se refiere a las recibidas por un colectivo, y se mide en Sv·persona.

60

¿QUÉ DOSIS RECIBEN NORMALMENTE LAS PERSONAS?

Los seres humanos están sometidos a radiaciones procedentes del fondo natural, así como del fondo derivado de las actividades humanas.

La radiación natural se debe a tres causas: la radiación cósmica, los elementos radiactivos contenidos en la corteza terrestre, y los isótopos radiactivos

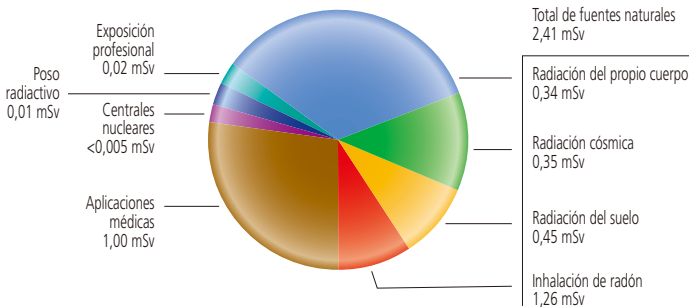
presentes en el propio organismo de los individuos. La dosis recibida a causa de este fondo natural varía mucho de unos a otros puntos de la Tierra.

De acuerdo con un informe presentado por el Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso y al Senado, la dosis que como promedio recibe una persona, por causas naturales, es de 2,41 mSv/año. Esta dosis se reparte, aproximadamente, en: 0,35 mSv/año a causa de la radiación cósmica, 0,45 mSv/año por la radiación del suelo, 1,26 mSv/año por la inhalación del radón, 0,34 mSv/año por los isótopos incorporados al organismo y 0,01 mSv/año por el poso radiactivo de los experimentos nucleares.

Hay que hacer notar que las grandes diferencias en el fondo natural entre distintas regiones de la Tierra no parece que afecten a la incidencia de cáncer, defectos genéticos, etc., lo que constituye un dato significativo a la hora de estudiar los efectos de la radiación sobre las personas.

La dosis recibida como consecuencia de las actividades humanas depende en gran medida de las vicisitudes por las que atraviesan las personas. Por ejemplo, una persona que hiciera viajes en avión para recorrer 25.000 km al año recibiría 1 mSv más que otra persona que llevara el mismo régimen de vida y que no volara nunca. Entre todas las fuentes de irradiación de este tipo la más importante es la contribución debida a las exploraciones radiológicas con fines médicos, la cual varía considerablemente entre distintas personas: en una radiografía de tórax se recibe una dosis de 0,05 mSv; en una tomografía computarizada de región lumbar la dosis es de 6 mSv.

DOSIS EQUIVALENTE EFECTIVA, POR PERSONA Y AÑO, RECIBIDA POR LA POBLACIÓN



En relación con la dosis recibida por la presencia de centrales nucleares, una persona que permaneciera todo el año a una distancia inferior a 2 km de la central, recibiría una dosis adicional de 0,005 mSv/año; la dosis disminuiría a medida que la persona se alejara de la central, de tal modo que si se mantuviera a una distancia superior a los 10 km no recibiría dosis adicional alguna. Conviene recordar aquí que la reglamentación establece zonas de acceso prohibido o restringido en el entorno de una central nuclear, por lo que puede considerarse que es nula la dosis que por esta causa recibe el público en general.

61

¿SON PELIGROSAS LAS RADIACIONES IONIZANTES PARA LOS SERES VIVOS?

La respuesta a una pregunta tan simple y categórica no puede reducirse a un SÍ o un NO, sin más distinciones, sino que exige una contestación más detallada.

Las radiaciones se pueden emplear para producir un efecto beneficioso a las personas: las radiaciones X y gamma se usan con efectos curativos o paliativos en el tratamiento de tumores en la técnica denominada radioterapia; también en medicina se emplean la radiación X o los isótopos radiactivos con fines diagnósticos, en las especialidades de radiología y medicina nuclear. Pueden citarse otros ejemplos de utilización biológica de las radiaciones, que no están relacionados con la salud de las personas pero sí con su bienestar, como es el caso de la inducción de mutaciones genéticas en cereales para mejorar el rendimiento de las cosechas o la calidad de las proteínas contenidas en el grano.



Ahora bien, las radiaciones pueden producir daños o implicar riesgos para los seres vivos, aunque también aquí hay que matizar que los efectos producidos por la radiación dependen de las dosis recibidas. Con dosis muy altas se produce la muerte del individuo; con dosis menores, pero todavía altas, se producen lesiones tanto más graves cuanto mayor es la dosis; las dosis bajas no producen necesariamente un daño sino que hacen aumentar la probabilidad de que se origine el daño, en función de la dosis recibida.

Por ello y fuera de los casos específicos en que la radiación se emplea deliberadamente para producir un determinado efecto beneficioso, la reglamentación considera que las radiaciones son potencialmente peligrosas y hay que precaverse frente a ellas.

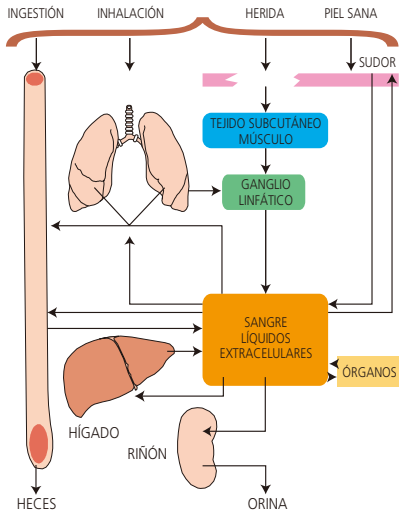
62

¿CUÁLES SON LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES?

La exposición de los seres vivos a las radiaciones ionizantes produce diversos efectos biológicos a consecuencia de la absorción de la energía de la radiación por el ser vivo. Los cambios producidos pueden estudiarse a nivel celular, de órgano o tejido, o del organismo considerado en su conjunto.

En la célula se producen ionizaciones y excitaciones, con formación de iones y radicales libres, que dan lugar a reacciones químicas, las cuales originan alteraciones en el funcionamiento de la célula. Estas alteraciones, dependiendo de la dosis recibida, pueden producir fallos o retrasos en la reproducción de la célula o incluso su muerte. La sensibilidad de las células frente a las radiaciones varía mucho según el tipo de célula; es mucho mayor en las células menos diferenciadas y con mayor capacidad de división celular y depende también del momento del ciclo celular en el que se produce la irradiación, siendo la célula más radiosensible en las fases de división en comparación con las de reposo celular.

Si consideramos los efectos de la radiación sobre un órgano o un tejido, ellos estarán en relación con el tipo de población celular que compone el



Formas de contaminación interna.
Vías de transferencia y eliminación

tejido; los efectos sobre la salud del individuo dependerán también del papel fisiológico que juegue el órgano o tejido. Se denominan órganos críticos aquellos que se ven más afectados por la radiación y dan lugar a consecuencias más graves para el organismo. Los principales órganos críticos son: la médula ósea, donde se producen las células sanguíneas; el intestino delgado, en el que se realizan los procesos de digestión y absorción de los alimentos; y las gónadas, donde se producen y maduran las células germinales.

Los efectos de la absorción de una gran dosis de radiación por el conjunto del organismo recibe el nombre de síndrome de irradiación, cuyas manifestaciones clínicas están en función de las dosis recibidas y reflejan el daño producido sobre la médula ósea, el intestino y el sistema nervioso central.

63

¿CÓMO SE CLASIFICAN LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES?

Los efectos biológicos de las radiaciones pueden clasificarse con arreglo a diferentes criterios: los tres más usuales son la clasificación respecto a la relación causa-efecto entre la radiación recibida y los daños que produce; la relación temporal entre el momento en que tiene lugar la irradiación y el momento en el que se manifiestan las lesiones; y, por último, la aparición de los efectos en el individuo que recibió la radiación o en sus descendientes.

- Con el primer criterio, los efectos se clasifican en causales (o determinísticos) y aleatorios (o estocásticos). En los efectos causales la gravedad de las lesiones es tanto mayor cuanto mayor es la dosis recibida; por debajo de una dosis mínima o umbral no se producen. Generalmente estos efectos están producidos por dosis altas de radiación que afectan a los tejidos más sensibles a la radiación y de renovación rápida, como son la médula ósea, el aparato digestivo, la piel, los testículos y los ovarios.

Los efectos biológicos aleatorios se denominan también estocásticos. Están caracterizados porque en ellos es la probabilidad de que ocurra el efecto biológico la que depende de la dosis y no la gravedad como en el caso anterior. Son efectos del tipo “todo o nada” que sólo aparecen en algún individuo de los que reciben una misma dosis de radiación. Estos efectos de carácter probabilístico probablemente carecen de dosis mínima o umbral; en la duda y como mayor precaución la reglamentación supone que no hay tal dosis umbral. Por tanto, una dosis mínima de radiación podría producirlos al actuar sobre una parte importante de la célula como el ácido desoxirribonucleico (DNA), ocasionando una alteración grave.

Los efectos aleatorios o estocásticos, caso de producirse, son siempre graves y comprenden la posible aparición de tumores malignos del tipo de leucemias, cánceres de pulmón, piel, etc., y las alteraciones genéticas del tipo de las anomalías hereditarias.

- Con el segundo criterio, los efectos se clasifican en inmediatos (también llamados tempranos o agudos), los cuales se manifiestan entre unas horas y unas semanas después de someterse a la radiación, y diferidos, los cuales aparecen al cabo de algunos años después de la exposición a la radiación.
- Por último, los efectos pueden dividirse en somáticos, cuando los daños se manifiestan en el individuo que ha recibido la radiación y genéticos, cuando dan lugar a lesiones en sus células reproductoras, por lo que pueden aparecer alteraciones en su descendencia.



¿QUÉ EFECTOS BIOLÓGICOS SE PRODUCEN CON DOSIS ALTAS DE RADIACIÓN?

Las dosis altas de radiación producen efectos inmediatos o tempranos de tipo causal. Cuando la dosis es muy elevada, superior a 100 Gy se origina la muerte del individuo en un breve plazo, entre algunas horas y unos días, a causa de las lesiones producidas en el sistema nervioso central.

Si la dosis está comprendida entre 10 Gy y 50 Gy el fallecimiento tiene lugar entre una y dos semanas después de la irradiación, debido a lesiones gastrointestinales.

Las dosis entre 3 Gy y 5 Gy afectan fundamentalmente a la médula ósea, productora de las células sanguíneas, lo que puede provocar el fallecimiento de la mitad de las personas irradiadas en un plazo de uno a dos meses.

Con dosis inferiores se producen alteraciones en diversos órganos y tejidos, que luego van seguidas de una reparación y cicatrización de los mismos, lo que da lugar a una recuperación total o parcial.

Cuando se produce una irradiación moderada de la piel con radiaciones de pequeño poder penetrante, se ocasiona un enrojecimiento con inflamación, o eritema, que puede ir seguido de ulceraciones si las dosis son algo mayores.

Los órganos genitales son particularmente sensibles a la radiación: dosis de 2 Gy en los testículos pueden producir una esterilidad definitiva, y dosis de 0,1 Gy una esterilidad temporal; el ovario es algo menos sensible, por lo que la esterilidad no se produce con dosis inferiores a los 3 Gy.

De las estructuras del globo ocular el cristalino es la más sensible a la radiación, pudiendo opacificarse para producir cataratas, las cuales pueden evolucionar a ceguera. El feto es particularmente vulnerable a las radiaciones por la inmadurez de sus tejidos, por lo que deben extremarse las precauciones para evitar la posible exposición en el caso de la mujer gestante.

¿QUÉ EFECTOS BIOLÓGICOS SE PRODUCEN CON DOSIS BAJAS DE RADIACIÓN?

El estudio de los efectos biológicos de la radiación a dosis bajas tiene un gran interés, porque el hombre está sometido de forma continua a la radiación natural, así como a radiaciones de origen humano provenientes de los usos médicos de las radiaciones, explosiones nucleares y aplicaciones industriales y energéticas de la energía nuclear. Además una porción de público, la denominada personal profesionalmente expuesto, está sometida por razón de su trabajo a dosis bajas de radiación adicional durante muy prolongados períodos de su vida laboral.

El primer problema que nos plantea el estudio de los efectos de la radiación a dosis bajas es que dada su pequeñísima incidencia pueden quedar englobados o enmascarados por otras causas diferentes a las radiaciones que con mucha mayor frecuencia pueden producir aislada o simultáneamente los mismos efectos. Además, y por esta baja incidencia, desde el punto de vista metodológico estadístico sería necesario estudiar muestras de población amplias, del orden de millones de personas, para que los resultados fueran significativos y hacerlo a lo largo de varias generaciones, ya que dichos efectos pueden ser producidos al cabo de muchos años de la exposición. Debe contarse asimismo con una población comparativa de control no expuesta a las radiaciones y cuyos efectos ambientales fueran los mismos.

Los posibles efectos biológicos de las radiaciones a dosis bajas son los cancerígenos y los genéticos. Dadas las dificultades antes expuestas para el estudio de los mismos, se han producido diferentes modelos basados en interpolar los datos obtenidos de los efectos producidos a dosis altas de exposición, es decir, suponiendo que no existe un umbral por debajo del cual no se producen efectos. Otros autores admiten hipótesis supra o infralineales, según las cuales estos efectos serían respectivamente algo superiores o inferiores a los de la teoría lineal, y otras, en fin, sostienen que existe un umbral de dosis. Según un informe de expertos de Nacio-

nes Unidas del año 1980, en la práctica con dosis muy bajas de radiación el riesgo real es 2 a 10 veces menor que el calculado a partir de la hipótesis lineal. No obstante y como medida de precaución en protección radiológica se adopta el criterio de la hipótesis lineal sin umbral, por ser el más prudente.

Con respecto a los efectos carcinogénicos y aunque en teoría se establece como hipótesis la ausencia de umbral, a dosis bajas, inferiores a 0,5 Gy, no se ha comprobado incremento de la incidencia de cáncer como consecuencia de las mismas, lo cual no quiere decir que no pueda existir, sino que en el estado actual de las investigaciones epidemiológicas no es demostrable. Los estudios han sido amplios y variados, habiéndose realizado en mineros de minas de uranio sometidos a alta contaminación por radón, supervivientes de Hiroshima y Nagasaki, pacientes tratados con yodo radiactivo por padecer cáncer de tiroides, etc.

En el caso de los efectos genéticos, la demostración del posible efecto de la exposición a dosis bajas de radiación es también dificultosa, ya que si en el caso del cáncer hay que tener presente que el 22% de la población muere por esta causa, los defectos genéticos ocurren espontáneamente entre el 6% y el 10% de los recién nacidos, aunque la mayor parte de ellos son de mínima importancia. En la práctica no se ha observado aumento de la incidencia de alteraciones hereditarias en los descendientes de personas expuestas a niveles relativamente altos de radiación, como es el caso del estudio realizado en los descendientes de radiólogos americanos, cuando los equipos tenían deficiente radioprotección o en hijos y nietos de pacientes irradiados a causa de padecer tumores malignos.

Para terminar, es conveniente situar los riesgos de las radiaciones ionizantes a bajas dosis en relación a los demás riesgos de la vida cotidiana, ya que toda actividad humana lleva consigo un riesgo, por pequeño que este sea. En un estudio comparativo llevado a cabo en Francia se ha visto que el riesgo que corresponde a la dosis de exposición máxima admisible de media jornada en una central nuclear o una estancia de tres años cerca de la misma es el mismo que representa fumar un cigarrillo, viajar 650 km en avión o 100 km en coche o beber media botella de vino. Esto, que puede parecer anecdótico, significa que la evaluación de un riesgo real debe hacerse no sólo en términos cualitativos sino también cuantitativos, calculándose cual es la verdadera magnitud del mismo con relación a los demás riesgos de la vida.

¿QUÉ DIFERENCIA EXISTE ENTRE IRRADIACIÓN Y CONTAMINACIÓN RADIATIVA?

Recibe el nombre de irradiación o exposición la acción de someter a una persona u objeto a las radiaciones ionizantes. Se habla de irradiación externa cuando la fuente de radiación es exterior al individuo, mientras que la irradiación interna está originada por fuentes radiactivas situadas en el interior del individuo. Cuando existen simultáneamente ambos tipos de fuentes, la exposición total es la suma de las dos exposiciones parciales. Si el organismo completo sufre la irradiación, se dice que se trata de una exposición global, mientras que el término exposición parcial se refiere a la irradiación de un órgano determinado.

Contaminación es la presencia indeseada de sustancias radiactivas en la superficie o en el interior de un cuerpo u organismo. En el primer caso se habla de una contaminación externa y en el segundo de una contaminación interna. Una persona sufrirá una contaminación externa cuando se depositen sobre su piel sustancias radiactivas, mientras que la contaminación interna se producirá cuando penetren isótopos radiactivos en el organismo, sea por ingestión, sea por inhalación o a través de heridas, etc.

Un individuo irradiado por una fuente radiactiva exterior a él sufre en sus tejidos los efectos biológicos de la radiación mientras está próximo a la fuente, pero bastará que se aleje suficientemente de ella para que cese la irradiación. Por el contrario, un individuo contaminado continuará siendo irradiado en tanto no cese la contaminación, y él mismo puede actuar como fuente de contaminación o irradiación de otras personas.

La contaminación externa es fácilmente eliminable mediante lavado de la superficie contaminada, mientras que en la contaminación interna los efectos dependerán del tropismo de los elementos radiactivos, que los hace depositarse en unos u otros órganos en función de las características metabólicas de los mismos; la permanencia de la actuación de los radionucleidos depende, por una parte, de la capacidad de eliminación de esa sustancia por el organismo a través de las vías naturales, y, por otro, del período de semidesintegración del isótopo en cuestión.

¿QUÉ ES LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y CUÁLES SON SUS OBJETIVOS?

El mal uso de las radiaciones ionizantes puede ser peligroso para los seres vivos, por lo que en toda actividad en la que pueda producirse una irradiación a partir de una fuente de radiación o de una contaminación radiactiva, es necesario asegurarse que las personas y otros seres vivos que se desea proteger no reciben una dosis que pueda originarles riesgos radiactivos o, menos aún, producirles un daño cierto.

De esto se ocupa la protección radiológica, que se define como el conjunto de normativa, métodos y acciones que se toman para evitar dichos riesgos y daños, así como las acciones, medidas y análisis que se llevan a cabo para comprobar que se han aplicado correctamente los criterios de protección adecuados. En una instalación nuclear o radiactiva existe la posibilidad, al menos teórica, de que se emitan productos radiactivos al medio ambiente, los cuales podrían perjudicar luego a los seres vivos; por ello, la protección radiológica se ocupa también de establecer los límites de emisiones radiactivas al ambiente y la medida de la radiactividad en éste.

No se crea que la protección radiológica ha nacido con las centrales nucleares, sino que al comprobarse que el uso indebido de las radiaciones es peligroso, en 1901 se establecieron las primeras normas de protección frente a los rayos X, y en 1916 las primeras recomendaciones sobre protección frente a los rayos X y al radio. Durante las primeras cuatro décadas del siglo XX las radiaciones ionizantes se emplearon únicamente en medicina, por lo que la protección radiológica se ocupó sólo de los usos médicos de las radiaciones.

Cuando hacia la mitad del siglo XX se produjeron los desarrollos de las aplicaciones de la energía nuclear, la protección radiológica pasó a ocuparse también de los temas nucleares y adquirió el auge e importancia que hoy tiene.

¿CUÁLES SON LOS ORGANISMOS INTERNACIONALES QUE SE OCUPAN DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?

El más veterano entre todos ellos es la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), constituido en 1928 bajo la denominación de Comisión internacional para la protección frente a los rayos X y el radio, nombre que expresa que su cometido se refería a las aplicaciones médicas de la radiación. Originalmente estaba formada solamente por médicos y biólogos, pero al ampliar sus cometidos a la protección radiológica de instalaciones nucleares y radiactivas, en 1950, además de cambiar de nombre ha incorporado en su seno a físicos, químicos, ingenieros, etc.

De ella dependen cuatro comités dedicados a:

- Efectos de las radiaciones.
- Definición de límites secundarios de la carga corporal.
- Protección radiológica en medicina.
- Implantación de las recomendaciones que ella formula.

A pesar de que esta Comisión no tiene carácter intergubernamental, su prestigio y la solidez científica de sus recomendaciones hacen que éstas sean aceptadas por todos los organismos internacionales y adoptadas por las reglamentaciones oficiales de todos los Estados que desarrollan actividades nucleares.

- El organismo nuclear intergubernamental más importante del mundo es el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), creado por las Naciones Unidas en 1957. La sede del Organismo está en Viena, y forman parte de él 140 Estados, según datos de 2006. Sus cometidos son muy amplios dentro del campo de la energía nuclear, tales como: investigación y desarrollo, celebración de conferencias científicas, control sobre los usos pacíficos de los materiales fisionables y formulación

de recomendaciones sobre seguridad nuclear y protección radiológica. La reglamentación española exige que estas recomendaciones del OIEA —como las de los restantes organismos internacionales de los que España forma parte— sean de obligado cumplimiento en las instalaciones nucleares y radiactivas españolas.

- La Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA) fue creada en el seno de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico en 1957. Forman parte de ella 28 Estados, entre ellos 21 Estados europeos, además de Canadá, Estados Unidos, Japón, Corea, México, Australia y Nueva Zelanda; su sede está en París. Dentro de la Agencia existen cuatro direcciones técnicas: ciencias y técnicas nucleares; desarrollo tecnológico; seguridad nuclear; protección radiológica y gestión de residuos radiactivos. Al pertenecer España a la NEA, sus recomendaciones —al igual que ocurre con el OIEA— son de obligado cumplimiento en España.
- La Comunidad Europea de Energía Nuclear (EURATOM), hoy integrada dentro de la Unión Europea, establece también una normativa sobre protección radiológica, que es exigida a los países de la Unión.
- Existen otros organismos internacionales que formulan recomendaciones sobre protección radiológica. Como más importantes merecen citarse: la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), y el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR).



¿QUÉ ORGANISMO ESTÁ ENCARGADO EN ESPAÑA DE LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?

Desde el mismo momento en que se iniciaron las investigaciones nucleares en España, en 1948, en la anterior Junta de Energía Nuclear, también en este centro investigador se desarrollaron los trabajos para asegurar la protección radiológica de los trabajadores, ciudadanos y del país.

En consonancia con lo decidido en otros países que utilizaban la energía nuclear y ante el auge que adquiriría esta energía, en 1980 se decidió crear un organismo consagrado exclusivamente a la seguridad nuclear y la protección radiológica, organismo que habría de actuar con total independencia de las demás Administraciones públicas.

Para ello, la Ley 15/1980, de 22 de abril, creó el Consejo de Seguridad Nuclear “como Ente de Derecho Público, con personalidad jurídica y patrimonio propio e independiente de los del Estado, y como único Organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica”. El Consejo está regido por un presidente y cuatro consejeros, “designados entre personas de conocida solvencia dentro de las especialidades de seguridad nuclear, tecnología, protección radiológica y del medio ambiente, medicina, legislación o cualquier otra conexas con las anteriores, así como en energía en general o seguridad industrial, valorándose especialmente su independencia y objetividad de criterio” y dispone de un cuerpo de funcionarios propios, el Cuerpo técnico de seguridad nuclear y protección radiológica. El Consejo de Seguridad Nuclear responde de su actuación ante el Parlamento, al cual remite un informe anual detallado de la actividad nuclear, e informa a la ciudadanía, entre otras formas mediante el acceso a la web, www.csn.es.

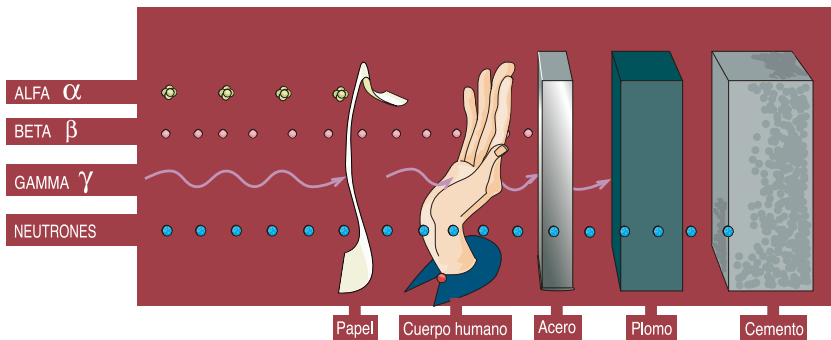
Vemos, pues, que la protección radiológica es cuestión que ha interesado al Estado desde el mismo momento en que se iniciaron las actividades nucleares en España y que existe un organismo técnico, capaz e independiente, que vela por la protección de las personas y del medio ambiente, en relación con las radiaciones ionizantes.

¿CÓMO PUEDEN PROTEGERSE LAS PERSONAS DE LA IRRADIACIÓN DE UNA FUENTE EXTERNA?

Cuando una persona está sometida a la irradiación de una fuente externa, la dosis de radiación que se recibe es igual al producto de la tasa de dosis (dosis recibida en la unidad de tiempo) por el tiempo durante el cual se está expuesto a la radiación.

Por su parte, la tasa de dosis en un punto es proporcional al flujo de radiación en él, y este flujo decrece con el alejamiento de la fuente de radiación según el producto de otros dos factores: el primero sigue la ley de decrecimiento con el cuadrado de la distancia, es decir, que, aunque la radiación no fuese absorbida en su recorrido desde la fuente hasta el objeto de la irradiación, la tasa de dosis disminuiría en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al foco emisor, en el caso de una fuente puntual.

Además, la radiactividad es absorbida parcialmente por el medio interpuesto entre emisor y receptor, lo que significa que el segundo factor de decrecimiento de la tasa de dosis en función de la distancia sigue una ley exponencial.



Poder penetrante de los distintos tipos de radiaciones

Como consecuencia de lo anterior, la protección contra la irradiación por una fuente externa se consigue mediante la combinación de tres factores: tiempo de exposición, distancia y blindaje.

El tiempo de exposición ha de reducirse de modo que la persona permanezca en la zona de irradiación durante el período mínimo que sea imprescindible, y debe controlarse el tiempo en que se permanece en dicha zona.

La distancia entre la fuente y la persona ha de controlarse también, procurando que se esté lo más lejos que sea posible de la fuente.

Como no siempre es posible que la combinación entre tiempo de exposición y distancia den lugar a una dosis admisible, la protección se consigue interponiendo una sustancia que absorba la radiación entre la fuente y el sujeto. Es lo que se llama un blindaje contra la radiación.

- Las radiaciones alfa son absorbidas fácilmente por todos los cuerpos: bastan para ello unos centímetros de aire o algunas centésimas de milímetro de agua, por lo que la protección frente a la radiación alfa no necesita ningún blindaje.
- La radiación beta, aunque algo más penetrante, se absorbe también con facilidad, bastando para ello algunos metros de aire, unos milímetros de agua, o un sólido delgado.
- Por el contrario, la radiación gamma es muy penetrante, por lo que, para protegerse de ella, son necesarios blindajes de un material pesado, como pueden ser el plomo o el hormigón, de gran espesor.
- Los neutrones son también muy penetrantes, sin que sean absorbidos por el aire, pero sí por el agua. Los compuestos de algunos elementos químicos, como el boro y el cadmio, son buenos absorbentes de neutrones.
- En las centrales nucleares el reactor está rodeado de un fuerte blindaje, que absorbe gran parte de la radiación gamma y los neutrones, y la central se divide en áreas, según los niveles de radiación que hay en ellas. El acceso al interior de aquellas áreas en las que el nivel de radiación es apreciable está rigurosamente controlado y sólo se permite el acceso a ellas al personal que ha de realizar allí un trabajo concreto; a la vez se limita su tiempo de permanencia en la zona y se mide la dosis recibida, que nunca puede rebasar los límites autorizados por la reglamentación. En el exterior de la central, al igual que en las zonas de oficinas, descanso, etc., el nivel de radiación es nulo.

¿QUÉ MEDIDAS SE USAN PARA LA DESCONTAMINACIÓN RADIATIVA DE PERSONAS?

Como consecuencia de accidente o explosiones nucleares puede producirse la irradiación y contaminación de personas. Con objeto de no actuar de forma improvisada es necesario tener previstas y planificadas una serie de actuaciones. En el caso de que las personas precisen primeros auxilios de reanimación o tratamiento de urgencia, éstos primarán sobre las medidas de descontaminación. Es indispensable intentar conocer desde el primer momento cuales son los radionucleidos contaminantes así como sus formas físicas y químicas, ya que esto facilitará la actuación del personal sanitario.

En el caso de contaminación externa, la conducta que se sigue está encaminada a eliminarla y evitar que se incorpore al organismo a través de las heridas, orificios naturales, o inhalación, en el caso de atmósferas contaminantes. Las medidas consisten en quitar la ropa, almacenándola en bolsas de plástico, duchado con agua tibia y jabón neutro, en el caso de que la contaminación sea difusa, o simple lavado de las zonas contaminadas, en el caso de que ésta se reduzca a áreas definidas. El lavado y enjuague se repite las veces necesarias, controlando con un detector que la descontaminación sea lo más perfecta posible. En el caso de heridas y para evitar la incorporación de los agentes contaminantes a través de vasos linfáticos y sanguíneos, es conveniente la compresión de las venas próximas a las heridas y el lavado de las mismas con suero fisiológico, aplicando antisépticos y apósitos estériles.

Las medidas de descontaminación interna son más complejas y están en relación con las características metabólicas y capacidad difusora del radionucleido, sus características físicas (actividad, energía, período de semidesintegración), así como la vía de entrada y tropismo especial por determinados órganos. Por ejemplo, sabemos que el yodo radiactivo accede al tiroides, el cesio al músculo, el estroncio a huesos, etc. Las primeras me-

didadas que se toman tienden a favorecer la eliminación de radionucleidos, para lo que se hace tomar líquidos abundantes a la persona contaminada o laxantes suaves, fluidificantes bronquiales, etc., así como medicamentos convenientes para intentar formar complejos químicos con los radionucleidos, o para bloquear su captación por los órganos críticos.

72

¿CUÁLES SON LOS PRINCIPIOS BÁSICOS EN LOS QUE SE FUNDA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA?

Las radiaciones ionizantes no son siempre perjudiciales para la salud de las personas, y en determinados casos, como ocurre con las aplicaciones médicas de las radiaciones, pueden resultar beneficiosas. Pero ante la eventualidad de que las radiaciones produzcan daños, según las circunstancias, o impliquen un riesgo de que tenga lugar el daño, está universalmente admitido que, fuera de los casos de aplicaciones terapéuticas, las radiaciones ionizantes deben considerarse siempre como potencialmente peligrosas.

En consecuencia: nadie debe recibir nunca una dosis que no sea necesaria; la dosis ha de estar siempre por debajo de unos límites establecidos, que se sabe no son peligrosos; la dosis, aun por debajo de estos límites, ha de ser siempre la mínima posible; en el caso de que una persona desarrolle una actividad en la que pueda recibir dosis por encima del fondo natural, la dosis debe ser controlada y ha de medirse.

¿CUÁLES SON LAS NORMAS SOBRE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA QUE ESTABLECE LA REGLAMENTACIÓN?

La reglamentación española establece las dosis máximas que, bajo ningún concepto, se pueden rebasar. La reglamentación distingue entre miembros del público, que son las personas que no desarrollan actividades específicamente relacionadas con las radiaciones (es decir, el “ciudadano de a pie”) y el personal profesionalmente expuesto, que son las personas que trabajan en actividades nucleares, las cuales han adquirido una capacitación especial para efectuar estas tareas y están sometidas a un rígido control médico y radiológico.

Asimismo, para los isótopos radiactivos existen unos límites de la carga corporal admisibles; es decir, la cantidad máxima de cada isótopo que puede incorporarse al organismo.

Los valores de dosis máxima y de carga corporal admisible que recoge la reglamentación española son los mismos que los establecidos en otras reglamentaciones nacionales y recomendadas por los organismos internacionales.

Debido al desarrollo de los conocimientos científicos en relación con la protección radiológica, la CIPR en su publicación nº 60 (1990), recomendaba la modificación de los límites. Dicha recomendación fue recogida por EURATOM, que emitió la Directiva 96/29, estableciendo los nuevos límites que han entrado en vigor en los países miembros de la



Unión Europea en mayo del año 2000. En España, estos valores se incluyeron en la revisión del reglamento para la protección de las radiaciones ionizantes publicado el 26 de julio de 2001.

DOSIS DE EXPOSICIÓN A RADIACIONES IONIZANTES

-
- a) Para personal profesionalmente expuesto:
- Límite anual de dosis efectiva: 100 mSv acumulados en 5 años consecutivos; en 1 año < 50 mSv.
 - Límites anuales de dosis al cristalino: 150 mSv.
 - Límite anual de dosis para la piel: 500 mSv.
 - Límite de dosis anual para las manos, antebrazos, pies y tobillos: 500 mSv.
-
- b) Límites de dosis a estudiantes que vayan a dedicarse a una profesión que implique exposición a las radiaciones ionizantes o que deban manejar fuentes por razón de sus estudios:
- Si tienen 18 años o más, el límite es igual al del apartado a).
 - Si la edad está entre 16 y 18 años, los límites son 3/10 de los del apartado a).
-
- c) Límites de dosis al público en general:
- Límite anual de dosis efectiva: 1 mSv; puede autorizarse un valor superior en un año si la media en 5 años es < 1 mSv.
 - Límite anual de dosis al cristalino: 15 mSv.
 - Límite anual de dosis a la piel: 50 mSv.
 - Límite anual de dosis a las manos, pies y tobillos: 50 mSv.
-

Se establecen también límites para operaciones especiales planificadas; así como condiciones especiales a mujeres embarazadas, madres lactantes, aprendices y estudiantes.

Fuente: Reglamento sobre protección radiológica contra las radiaciones ionizantes. (26 julio 2001).

¿EN QUÉ CONSISTEN LAS MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA QUE SE ADOPTAN EN UNA CENTRAL NUCLEAR Y EN SU ENTORNO?

Con estas medidas se pretende garantizar que no se produzcan contaminaciones ni vertidos no autorizados de productos radiactivos y que la dosis de radiación que reciben las personas estén por debajo de los límites establecidos en la reglamentación.

Para ello la central se diseña y construye de tal modo que los productos radiactivos queden confinados, es decir, que se evite que puedan dar lugar a contaminación; los vertidos al exterior de pequeñas cantidades de ellos han de estar por debajo de unos límites que se han calculado previamente, teniendo en cuenta las características del entorno, de tal modo que no produzcan el más pequeño riesgo. Estos límites son aprobados por el Consejo de Seguridad Nuclear. Asimismo, en el proyecto se estudió qué blindajes hay que colocar para reducir los niveles de radiación dentro de la central, con objeto de permitir la realización de los trabajos a que haya lugar dentro de ella.

Antes de la puesta en marcha de la central se redacta el reglamento de operación, que de acuerdo con los niveles máximos de radiación que pueden alcanzarse en las distintas áreas de la central, la divide en zonas, según el tiempo de máxima permanencia en ellas: en la zona de acceso permanente, el nivel de radiación es nulo; hay varias clases de zonas controladas, según sus niveles de radiación, donde se limita quiénes y durante cuánto tiempo pueden permanecer y las precauciones que han de observarse.

Durante el funcionamiento de la central, se miden los niveles de radiación y de contaminación en las diversas zonas, para comprobar que están de acuerdo con lo previsto. El servicio de protección radiológica vela porque el personal cumpla el reglamento establecido y mide las dosis re-

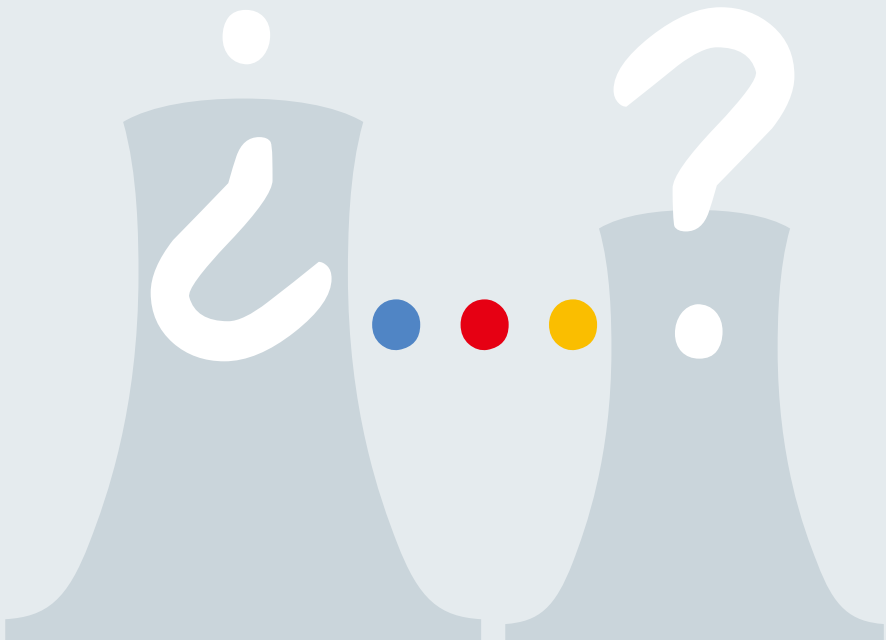
cibidas por las personas, y en el caso en que se produzcan desviaciones respecto a lo previsto en los reglamentos, decide las medidas que hay que tomar. Además, en las centrales nucleares el Consejo de Seguridad Nuclear mantiene desplazados de forma permanente a dos inspectores con plena capacidad de actuación.

Por lo que respecta al entorno, desde dos años antes de que se introduzca en la central algún material radiactivo se hace un control sistemático de la radiactividad ambiental (aire, ríos, mar, fauna, flora, cosechas, etc.) para conocer el fondo radiactivo de la región. Durante la explotación de la central se continúa con estas medidas, y la menor desviación por encima de los límites admitidos daría lugar a la parada inmediata de la central. Este programa se denomina de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRMA) y es aprobado específicamente por el Consejo de Seguridad Nuclear que supervisa su aplicación y resultados. Las medidas son realizadas por diferentes laboratorios de universidades, instituciones y empresas.

Además, existe un Plan de Emergencia Nuclear bajo la dirección de Protección Civil para la resolución de estas situaciones cuando afectan al exterior de una instalación. Cada una de éstas tiene uno específico de carácter interior para sucesos de este ámbito.

CAPÍTULO
6

APLICACIONES DE LOS ISÓTOPOS EN MEDICINA





La medicina incluye muchas técnicas de diagnóstico y curación basadas en el uso de las radiaciones ionizantes a través de técnicas instrumentales y de sustancias radiactivas. En España hay censadas cerca de 400 instalaciones médicas radiactivas y registrados alrededor de 25.000 aparatos de rayos X.

75

¿TIENEN APLICACIONES MÉDICAS LAS RADIACIONES IONIZANTES?

Las radiaciones ionizantes tienen múltiples aplicaciones en el campo de la medicina. La especialidad denominada radiología utiliza los rayos X procedentes de un tubo de rayos catódicos para la realización de múltiples tipos de exploraciones radiológicas diagnósticas. En la especialidad de medicina nuclear se manejan diferentes tipos de isótopos no encapsulados (en forma líquida o gaseosa) que son administrados al paciente o utilizados en laboratorio en pruebas analíticas con fines eminentemente diagnósticos. En el campo de la terapia las radiaciones ionizantes se emplean para el tratamiento de tumores malignos, dando lugar a la especialidad denominada radioterapia.

Además de en estas tres especialidades las radiaciones ionizantes procedentes de isótopos radiactivos se utilizan ampliamente en el campo de la investigación médica, habiéndose realizado gran número de estudios cinéticos y metabólicos en fisiología humana y animal por medio de radio-trazadores.

El gran desarrollo de estas especialidades se debe por una parte a un mejor conocimiento de la física y aplicaciones de las radiaciones y por otra a los continuos avances en los equipos de producción, detección y

utilización de las mismas. Los equipos más sofisticados tienen un elevado costo y exigen para su manejo personal multidisciplinario altamente especializado, que incluye no sólo médicos sino también radiofísicos, radiofarmacéuticos y químicos que trabajan en estrecha colaboración. Esto hace que en ocasiones sólo se disponga de estos servicios en grandes centros médicos que sirven a grandes núcleos de población. En la actualidad en España se cuenta, tanto a nivel de sanidad pública como privada, de múltiples centros que disponen de equipos de última generación y personal bien cualificado.

Hay que observar que existen otros procedimientos de prospección médica como la denominada "Resonancia Magnética Nuclear" que no utilizan las radiaciones ionizantes.

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) es una exploración radiológica que nace en el comienzo de los años 80 y permite obtener imágenes del organismo de forma incruenta (no invasiva) sin emitir radiación ionizante y en cualquier plano del espacio.

Posee la capacidad de diferenciar mejor que cualquier otra prueba de radiología las distintas estructuras anatómicas. Además, permite añadir al paciente durante la exploración soluciones de contraste paramagnéticas, por ejemplo utilizando el gadolinio, para delimitar aún más las estructuras y partes del cuerpo y mejorar su visionado.

La obtención de las imágenes se consigue mediante la estimulación de las moléculas del organismo con la acción de un campo electromagnético de alta intensidad con un imán de 1,5 tesla (equivalente a 15 mil veces el campo magnético de la tierra). Este imán atrae a los protones que están contenidos en los átomos de los tejidos y giran con un momento magnético determinado para cada elemento químico y que se alinearán con el campo magnético aplicado por su mayor intensidad.

Cuando se interrumpe el pulso magnético, los protones y su momento magnético vuelven a su posición original de relajación, liberando energía y emitiendo señales de radio que son captadas por un receptor y analizadas por un ordenador que las transformará en imágenes (cada molécula produce una señal diferente).

En la Resonancia Magnética las imágenes se realizan mediante cortes en tres planos: axial, coronal y sagital, sin necesidad de que el paciente

cambie su posición. Las resonancias magnéticas atraviesan los huesos y por ello se pueden ver muy bien los tejidos blandos.

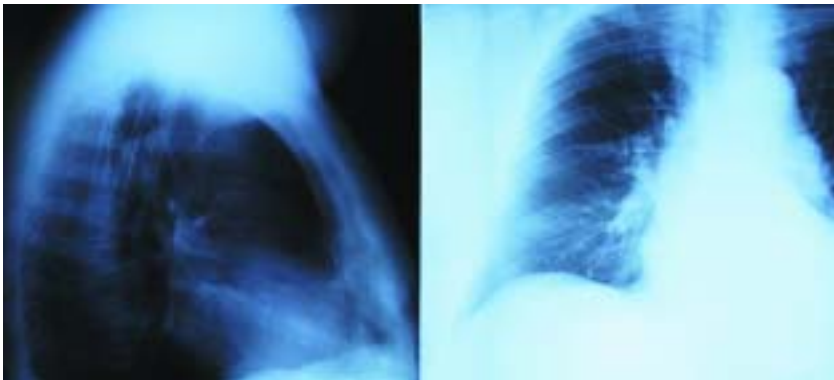
El paciente permanece tumbado en una camilla, y esta se desliza dentro del tubo que genera los campos magnéticos. El aparato genera campos magnéticos alrededor del paciente y emite ondas de radio que se dirigen a los tejidos a estudiar. Pero es incruento y no invasivo para el paciente.

Cada "corte" precisará de 2 a 15 minutos, por ello se puede tardar en esta exploración entre 30 y 60 minutos.

76

¿QUÉ ES EL RADIODIAGNÓSTICO?

Es el método diagnóstico que consiste en la obtención de imágenes del organismo por medio de un equipo de rayos X. El tubo elemental de rayos X consiste en un filamento incandescente (cátodo) que produce electrones, los cuales son acelerados en el vacío haciéndolos chocar contra un anticátodo, originándose radiación electromagnética denominada rayos X. Todo ello está contenido en una ampolla de vidrio, incluida en una envoltura forrada con plomo, excepto por el orificio de salida de la radiación.



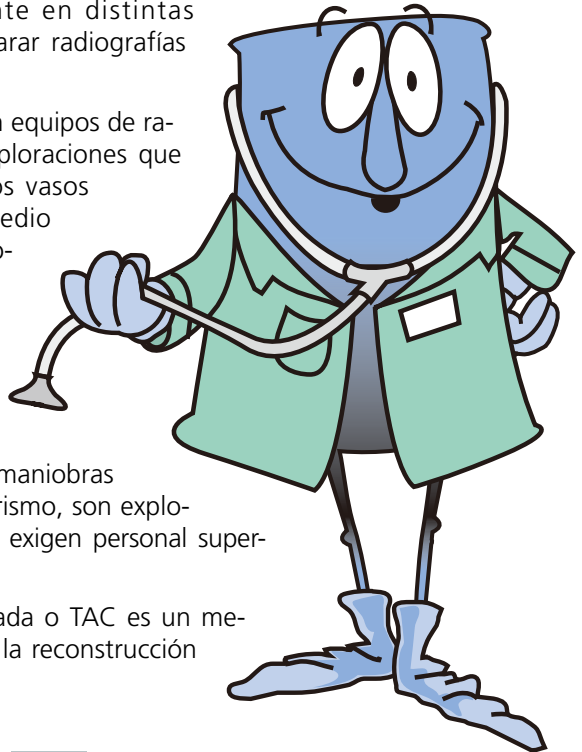
A partir del descubrimiento de los rayos X se han logrado enormes mejoras tanto en los equipos utilizados como en los medios de protección, habiéndose ampliado en gran manera las indicaciones de esta especialidad. En la actualidad son posibles estudios de esqueleto, tórax, abdomen, sistema nervioso, tubo digestivo, vías biliares, aparato urinario, vasos, corazón, etc., de forma que no hay órgano que se escape a este tipo de exploraciones.

La imagen radiológica se produce al atravesar el haz de rayos X la zona que se desea explorar y ser absorbidos los rayos X de manera diferente por los tejidos, obteniéndose un haz emergente que presenta variaciones de intensidad, las cuales se hacen visibles mediante sistemas de imagen en pantalla, denominándose entonces la exploración radioscopia o impresionando una película que una vez revelada da lugar a una radiografía.

Las instalaciones más elementales de radiología realizan sólo sencillos estudios radiográficos óseos, de tórax, riñones o de vías biliares. Las instalaciones más completas disponen de mesa basculante para colocar al paciente en distintas posiciones, siendo posible disparar radiografías en los momentos que se desee.

En los grandes hospitales existen equipos de radiología especializados para exploraciones que permiten la visualización de los vasos del sistema circulatorio por medio de la inyección de contrastes yodados, siendo de gran utilidad en exploraciones cerebrales, cardíacas, de extremidades y de abdomen. La radiología utilizada como control de toma de biopsias, evacuación de quistes o realización de maniobras terapéuticas, así como el cateterismo, son exploraciones aún más delicadas que exigen personal superespecializado.

La tomografía axial computarizada o TAC es un medio radiológico que consiste en la reconstrucción



mediante un ordenador de los cortes de un órgano o zona explorada producidos por un haz de rayos X muy fino que va girando alrededor del mismo.

La mamografía es la técnica radiológica utilizada para la exploración de los senos en la mujer, permitiendo el diagnóstico de lesiones mamarias benignas o malignas, incluso de muy pequeñas dimensiones.

La radiología dental utiliza equipos y procedimientos especiales como películas o tubos de rayos X intraorales o radiografías panorámicas de boca.

77

¿QUÉ ES LA MEDICINA NUCLEAR?

La medicina nuclear es una especialidad médica, de historia relativamente corta, unos 40 años, que utiliza las radiaciones ionizantes procedentes de los radisótopos o radionucleidos para realización de estudios morfológicos y funcionales de numerosos órganos, así como para las determinaciones radioanalíticas de numerosas sustancias contenidas en el organismo. Para la realización de los estudios sobre los pacientes es necesaria la introducción en el organismo de una pequeña cantidad de sustancia radiactiva denominada radiofármaco, por diferentes vías, generalmente la intravenosa o bien la digestiva, inhalación, etc. Estas sustancias, por su especial afinidad, se fijan en el órgano que se desea estudiar, emitiendo radiación gamma que es detectada por un equipo denominado gammacámara cuyo detector se sitúa sobre el órgano a explorar, recibiendo los fotones procedentes del radiofármaco.

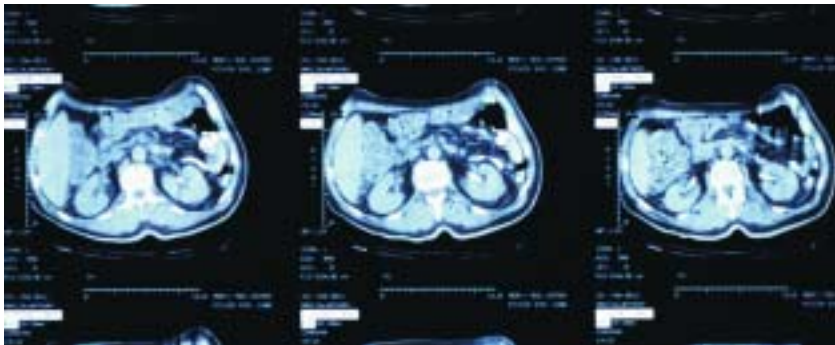
Estas señales son transformadas en impulsos eléctricos que son modulados, amplificados y procesados por medio de un ordenador adjunto al equipo, lo que permite la representación espacial del órgano, denominada gammagrafía, sobre una pantalla o placa de rayos X o papel o la visualización de imágenes sucesivas del mismo para el estudio de una determinada función. Recientemente se cuenta con cámaras que permiten

la obtención de cortes del órgano según las tres direcciones del espacio, lo que mejora la calidad de los estudios y la sensibilidad diagnóstica.

En algunos centros se dispone de equipos denominados de PET (tomografía por emisión de positrones) que emplean radionucléidos que emiten positrones en vez de fotones como en los métodos clásicos de medicina nuclear. La calidad de las imágenes obtenidas con estos equipos es superior a la de los convencionales, pero en la actualidad debido a su alto coste y complicada tecnología, ya que es preciso disponer de un ciclotrón para producir isótopos de vida media ultracorta del orden de minutos u horas, sólo existen equipos comercializados en el mundo en países con alto nivel de tecnología médica. España dispone de varios de estos equipos en la actualidad, teniendo sus principales aplicaciones en los campos de oncología, cardiología y neurología.

Las ventajas fundamentales de los métodos exploratorios de medicina nuclear son el no ser peligrosos ni molestos para el paciente y el tener efectos secundarios mínimos, ya que la radiación que se recibe es igual o menor a la de estudios radiológicos de rutina.

Las técnicas analíticas denominadas radioinmunoanálisis permiten la detección y cuantificación de numerosas sustancias que están en cantidades muy pequeñas en sangre u orina y que son muy difíciles de detectar por medios analíticos convencionales. Se realizan gracias a un ingenioso sistema que combina una reacción de unión antígeno-anticuerpo con el marcado con un isótopo, generalmente el yodo-125, de uno de estos dos componentes.



Aunque la medicina nuclear es una especialidad fundamentalmente diagnóstica, los radisótopos no encapsulados pueden utilizarse como medio de tratamiento en aplicaciones puntuales, hablándose entonces de radioterapia metabólica. Esta consiste en administrar una dosis relativamente grande de sustancia radiactiva en forma líquida por medio de inyección o ingestión para que se acumule en el órgano o lugar tratado, donde actúa por medio de la radiación emitida sobre los tejidos en contacto próximo con ella. La aplicación más frecuente es el tratamiento de pacientes con cáncer de tiroides o hipertiroidismo y para la realización del mismo, los pacientes son generalmente ingresados en unidades de hospitalización especiales que disponen de habitaciones con medios de radioprotección y son atendidos por personal especializado.

78

¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES APLICACIONES DIAGNÓSTICAS DE LOS ISÓTOPOS?

Prácticamente todas las especialidades médicas pueden beneficiarse de los estudios morfológicos, funcionales y analíticos de la medicina nuclear. Los estudios morfológicos pueden completarse con técnicas exploratorias de imagen radiológicas y ecográficas u otras de reciente adquisición como la tomografía axial computarizada o la resonancia magnética nuclear.

- Dentro de la especialidad de endocrinología tienen gran interés los estudios gammagráficos tiroideos o suprarrenales, junto con las determinaciones hormonales útiles para el estudio de estos mismos órganos así como de la hipófisis, problemas de crecimiento, desarrollo sexual, fertilidad, diabetes, etc.
- En la especialidad de cardiología las aplicaciones se centran sobre todo en el diagnóstico de las alteraciones de la circulación cardíaca que producen cuadros como las anginas o infartos de miocardio, así como en el diagnóstico de las cardiopatías congénitas.

- Los estudios pulmonares permiten estudiar la vascularización y ventilación pulmonar, las cuales están afectadas en numerosas enfermedades del aparato respiratorio.
- Las exploraciones de aparato digestivo son muy variadas, incluyendo estudios de la función del esófago y estómago, estudios hepáticos para el diagnóstico de cirrosis, quistes o tumores o estudios de vías biliares utilizados en presencia de infecciones de vesícula o cálculos biliares. También pueden administrarse comidas que contienen pequeñas cantidades de sustancias radiactivas para estudiar los trastornos de digestión o absorción intestinal.
- La función y morfología del riñón y vías urinarias pueden valorarse mediante técnicas isotópicas que ponen de manifiesto procesos renales, obstrucción de vías urinarias, viabilidad de trasplantes renales, etc.
- En pacientes con traumatismos, infecciones o tumores de los huesos la gammagrafía ósea muestra una acumulación exagerada y anómala del radiofármaco inyectado en las zonas alteradas, lo que permite el diagnóstico de estos procesos.
- En pacientes oncológicos los estudios convencionales de medicina nuclear y sobre todo los estudios con PET permiten realizar el estudio del tumor, indispensable para la toma de decisiones terapéuticas.
- Los estudios funcionales del sistema nervioso central son muy útiles en la valoración de pacientes con diversos tipos de demencias, epilepsias, enfermedades vasculares o tumorales, en las cuales los estudios con diferentes isótopos permiten la visualización de zonas funcionalmente afectadas que no pueden diagnosticarse por otras técnicas de estudio puramente de imagen como la tomografía computarizada o la resonancia magnética.
- Dentro del campo de las aplicaciones analíticas de laboratorio tienen gran interés los estudios hormonales endocrinológicos, así como la determinación de los denominados marcadores tumorales que son sustancias producidas específicamente por los tumores y cuya presencia en sangre permite el diagnóstico y seguimiento de los mismos. También se aplican en el estudio de pacientes con enfermedades alérgicas, hepatitis, control antidoping y diferentes estudios sanguíneos.

¿CUÁLES SON LOS ISÓTOPOS MÁS UTILIZADOS EN MEDICINA NUCLEAR?

La medicina nuclear utiliza diferentes tipos de isótopos para sus aplicaciones diagnósticas y terapéuticas. La elección de los mismos está condicionada por la necesidad de que no sean tóxicos, tengan un tipo de emisión radiactiva idónea, baja energía y período de semidesintegración corto, para que la dosis absorbida sea pequeña. Su eliminación debe ser rápida para que el tiempo de permanencia en el organismo no sea prolongado.

Para la realización de estudios sobre pacientes puede utilizarse un radionucleido puro que se fija en el órgano a explorar, como en el caso del radioyodo que es captado por la glándula tiroides, o bien pueden marcarse diferentes moléculas que tengan un gran tropismo para el órgano que se desea estudiar, como los coloides marcados para los estudios gammagráficos hepáticos o los fosfatos marcados para los estudios óseos, en cuyo caso hablamos de radiofármacos.

El isótopo más ampliamente utilizado actualmente en los servicios de medicina nuclear es el tecnecio-99 metaestable, que emite radiación gamma y tiene un período de semidesintegración de seis horas, por lo que es necesario disponer de generadores, que son recipientes blindados que se reciben habitualmente de forma semanal en los servicios de medicina nuclear y que contienen en su interior un isótopo padre (el molibdeno-99), de vida media más larga a partir del cual se obtiene el isótopo hijo (tecnecio-99), que es utilizado diariamente para las exploraciones. El tecnecio se combina fácilmente con moléculas portadoras que permiten el estudio de órganos muy variados como esqueleto, corazón, hígado y bazo, vías biliares, tracto digestivo y cerebro. Además del tecnecio se utilizan otros emisores gamma de período de semidesintegración corto como el talio-201 para estudios cardiacos, el galio-67 para detección de tumores, el indio-111 para procesos inflamatorios, el yodo-131 y 123 para estudios tiroideos y renales y el xenón-133 para estudios pulmonares.

Para los estudios con PET el radiofármaco más utilizado es la flúor desoxiglucosa marcada con flúor-18.

En los estudios analíticos denominados de radioinmunoanálisis (RIA) se utiliza principalmente el yodo-125 y a veces el tritio.

En las aplicaciones terapéuticas denominadas de terapia metabólica se utiliza fundamentalmente el yodo-131 en forma líquida para el tratamiento de pacientes portadores de cáncer de tiroides o hipertiroidismo, en cuyo caso las dosis administradas son mucho mayores que en el caso de las aplicaciones diagnósticas, por lo que el paciente es generalmente ingresado en el hospital durante unos días. La utilización de beta emisores puros en aplicaciones como tratamiento de artritis o metástasis óseas no exige hospitalización ya que la emisión beta por su escasa capacidad de penetración no produce problemas de radioprotección para el paciente ni para sus familiares.

80

¿QUÉ ES LA RADIOTERAPIA?

La radioterapia es la especialidad médica que utiliza la administración de radiaciones ionizantes con fines curativos para la destrucción de tejidos malignos o tumores. Hace casi un siglo, dos médicos franceses, Bergonié y Tribondeau, demostraron que la radiosensibilidad de las células está en relación directa con su diferenciación y capacidad de reproducción, siendo más sensibles las células menos diferenciadas y con mayor ritmo de crecimiento. Dado que las células que componen los tejidos tumorales malignos cumplen habitualmente estas condiciones, dichos tumores pueden ser sometidos a la acción de las radiaciones que producirán la muerte de los tejidos tumorales, sobreviviendo los tejidos sanos circundantes que son más radorresistentes por estar compuestos de células más diferenciadas y de menor ritmo de crecimiento.

En el tratamiento de tumores malignos la radioterapia puede utilizarse sola o asociada a otros medios terapéuticos como la cirugía o la quimioterapia. La decisión del tipo de tratamiento se toma en función de una serie de factores como radiosensibilidad del tumor, localización y volu-

men tumoral, grado de evolución de la enfermedad, estado general del paciente, oportunidad de la irradiación y modalidad técnica empleada.

El estudio de los caracteres de las células tumorales, localización y extensión tumoral, permite, una vez decidida esta forma de tratamiento, planificar el tipo de irradiación, cálculo de la dosis total, forma de administración y posible fraccionamiento con intervalos de descanso que puede facilitar la reducción progresiva del tumor favoreciendo la eliminación de células muertas y permitiendo la mejor reparación de los tejidos circundantes.

Además de con fines curativos, la radioterapia puede utilizarse como terapéutica paliativa en casos de pacientes incurables, en los cuales la masa tumoral produce obstrucciones o compresiones de otros órganos que empeoran la calidad de vida del paciente. En estos casos la administración de radiación produce un descenso del volumen tumoral, aliviando los síntomas del paciente y mejorando su calidad de vida, lo que hace que este tipo de tratamiento constituya en estos pacientes una indicación de primer orden.

Las modalidades de radioterapia utilizadas reciben diferentes nombres en relación con las características de la radiación y del equipo que las genera.

81

¿QUÉ ES LA TELETERAPIA?

La teleterapia (tele: lejos) es la forma de radioterapia que utiliza la radiación procedente de un equipo generador situado a cierta distancia de la zona a irradiar. Esta modalidad de irradiación comprende una amplia gama de equipos. La radioterapia convencional o de ortovoltaje, de escasa utilización, se realiza por medio de equipos de rayos X de energías bajas o medias. Los equipos de alta energías o de megavoltaje más usados actualmente comprenden la bomba de cobalto y los aceleradores lineales.

Los equipos de rayos X de energías bajas se emplean más para tratamientos cutáneos, de forma que las dosis máximas se logran en superficie con escasa irradiación de los tejidos más profundos. Con energías

medias se alcanzan mayores profundidades, ampliándose las posibles indicaciones. Se utilizan diferentes tipos de filtros para reducir la radiación más blanda que afectaría a la piel inútilmente.

De los equipos de supervoltaje el más utilizado es la llamada bomba de cobalto, el cual contiene una fuente de cobalto-60 de uno a dos centímetros de diámetro que se sitúa en una carcasa blindada que impide la salida de radiación, salvo por un pequeño orificio diafragmado para proporcionar radiación dirigida. El cobalto-60 tiene un período de semidesintegración aproximado de cinco años y produce radiación de alta energía (1,2 MeV) capaz de irradiar tumores voluminosos y de localización profunda. El cabezal del equipo puede orientarse en cualquier dirección en consonancia con la mesa de tratamiento del paciente, según la planificación previa.

Los aceleradores lineales son equipos de teleterapia de alta energía (mayor de 3 MeV) que trabajan habitualmente con electrones, los cuales son acelerados al hacerlos viajar por un tubo acelerador donde un campo electromagnético de muy alta frecuencia tira de ellos hacia adelante en todos los puntos de la trayectoria del mismo. Estos equipos permiten elegir la energía adecuada según el tipo de tumor o profundidad. Los tiempos de exposición son cortos, con la ventaja de que solo emiten radiación en el momento de su uso, y por medio de diversos filtros se optimiza la dosis en el volumen tumoral. Tienen un alto costo inicial y de mantenimiento.

Existen algunos equipos muy sofisticados para aplicar técnicas especiales de radioterapia en lugares donde la cirugía tiene difícil acceso. Las técnicas se denominan radiocirugía y se aplican con aceleradores especiales o con equipos emisores de radiación con múltiples pastillas de cobalto-60 ("gamma-knife").

Otros equipos de uso exclusivo en investigación son reactores nucleares productores de neutrones y ciclotrones productores de otras partículas subatómicas.

Los aceleradores, al igual que cualquier otro equipo de radioterapia, tienen gran número de dispositivos de seguridad tanto para la protección del paciente como del personal que los utiliza. Estos dispositivos, así como las características del haz de radiación, deben ser medidos y comprobados periódicamente por el personal de cada centro hospitalario.

¿QUÉ ES LA BRAQUITERAPIA?

La braquiterapia (braqui: corto, próximo) es la modalidad de radioterapia que utiliza fuentes cerradas o selladas de material radiactivo que se colocan en contacto con el tumor o se introducen en el seno del mismo. Su mayor ventaja es la de concentrar la máxima dosis de radiación en el tejido tumoral con escasa irradiación del tejido sano situado alrededor, basándose en el hecho de que la dosis recibida en la proximidad de una fuente decrece muy rápidamente al alejarse de ella. Se denomina braquiterapia superficial cuando las placas de material radiactivo se colocan sobre la zona tumoral; endocavitaria cuando el material radiactivo se introduce en una cavidad del organismo (vagina y cuello de útero); in-



tersticial cuando se realiza la colocación quirúrgica de agujas, alambres o semillas radiactivas en el seno del propio tumor (mama, cuello, próstata), e intraluminal cuando la radiación se aplica por dentro de la luz de alguno de los conductos orgánicos (bronquio, esófago, vascular).

Aunque hace años el material radiactivo más utilizado en braquiterapia era el radio-226, actualmente ha sido sustituido por otros de características más idóneas y con menos riesgo radiológico como el estroncio-90, cesio-137, cobalto-60 e iridio-192.

En estas modalidades de tratamiento es necesaria la hospitalización en unidades especiales siguiendo normas de radioprotección similares a las de pacientes ingresados en unidades de medicina nuclear para el tratamiento radiometabólico. El paciente es dado de alta una vez que se retira la fuente radiactiva.

Como uno de los problemas de la braquiterapia, también llamada curio-terapia, es la posible exposición innecesaria del paciente y del personal sanitario que prepara, transporta y manipula las fuentes radiactivas, se han ideado una serie de métodos como la utilización de fuentes simuladas no radiactivas para el cálculo de su posición correcta en el paciente, el uso de mandos de control a distancia de las fuentes radiactivas o la retirada automática de las mismas hasta un lugar protegido en el caso de que surja alguna incidencia.

83

¿QUÉ SE HACE CON LOS RESIDUOS RADIATIVOS QUE SE PRODUCEN EN LAS ACTIVIDADES MÉDICAS CON ISÓTOPOS?

Como consecuencia de la utilización y manipulación de isótopos no encapsulados en medicina nuclear para el diagnóstico y tratamiento de pacientes, se produce una pequeña cantidad de residuos radiactivos de período corto y de baja concentración, que, no obstante, deben gestionarse siguiendo todos los criterios y normas legales previstos.

Los residuos procedentes de las dosis administradas y que son eliminados por los pacientes ingresados son sustancias radiactivas líquidas. Dada su vida media corta, en general, tras un período de espera en depósitos protegidos pierden gran parte de su actividad, pudiendo ser vertidos en la red de desagüe previa dilución, utilizándose sistemas de vertidos lentos y controlados.

Los residuos sólidos provienen de fuentes de calibración gastadas, jeringas contaminadas, tubos y viales utilizados en técnicas analíticas, así como productos contaminados por los pacientes ingresados, como ropas de cama, pijamas y otros objetos cuya contaminación será previamente comprobada. Deben ser generalmente almacenados hasta perder su actividad en recipientes con los blindajes apropiados, y sólo en el caso de persistir esta actividad a niveles valorables serán retirados por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA) para su almacenamiento definitivo en lugares adecuados.

En cuanto a los residuos gaseosos, vapores o partículas radiactivas en suspensión que se generan, habrá de tenerse en cuenta que los trabajadores de estas instalaciones radiactivas no superen nunca los límites permitidos de inhalación anual, utilizando sistemas de ventilación adecuados. Para la expulsión del aire contaminado deberá considerarse la posible utilización de medios de dilución o filtros con objeto de no sobrepasar los límites máximos permitidos de concentración de sustancias radiactivas en el aire.

En los servicios de medicina nuclear, considerados por la legislación como instalaciones radiactivas de segunda categoría, deben seguirse unas normas de protección radiológica para evitar riesgos de irradiación externa y de contaminación tanto en los pacientes como en el personal que trabaja en el servicio. Así mismo deberán efectuarse una serie de controles dosimétricos de contaminación de superficies, lugares y personas con la periodicidad conveniente y tener previstas una serie de actuaciones en caso de emergencia o accidente.

En los servicios de radioterapia se generan residuos sólidos en forma de fuentes encapsuladas (pilas de cobalto, agujas, alambres o semillas de material radiactivo) de muy poco volumen pero de actividad media. Debe llevarse un registro de los movimientos de cada fuente, pruebas de hermeticidad y tener previstas actuaciones ante incidentes o accidentes. La

retirada de las fuentes del servicio se realizará por la empresa autorizada (ENRESA).

En España hay censadas cerca de 400 instalaciones radiactivas médicas junto con más de 25.000 instalaciones de rayos X. Al año se generan alrededor de 40 m³ de residuos de baja y media actividad que incluyen mayormente estos residuos. En el 6º Plan Nacional de Residuos Radiactivos elaborado por ENRESA, hasta la fecha el volumen generado ha sido de 1.116 m³ y se espera para la vigencia del citado plan que alcance la cifra de 5.289 m³.

84

¿CUÁLES SON LAS ACTUACIONES MÉDICAS EN CASO DE UN ACCIDENTE NUCLEAR?

El Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN) tiene previsto en caso de emergencias nucleares en centrales o instalaciones radiactivas unas directrices de actuación para evitar o reducir los efectos de radiaciones ionizantes para la población, que incluyen la actuación de un grupo sanitario con funciones, personal y medios claramente definidos, que actuarían en conjunción con el grupo radiológico y logístico. Sus misiones serían las de aplicación de medidas profilácticas, la planificación, clasificación y tratamiento de bajas, tanto en los aspectos de primeros auxilios y ayuda a la evacuación (primer nivel de actuación) como el tratamiento de pacientes irradiados o contaminados en unidades especiales (segundo nivel de actuación) ubicadas en hospitales previamente autorizados y que disponen de medios de descontaminación, controles de radiactividad, protocolos de tratamiento previstos y habitaciones radioprotegidas asistidas por personal multidisciplinario experto en este tipo de actividad asistencial.



CAPÍTULO
7

APLICACIONES EN INDUSTRIA Y TECNOLOGÍA





La industria necesita utilizar diariamente técnicas nucleares como la radiografía industrial para la comprobación de materiales y soldaduras en la construcción y radisótopos para el control en procesos productivos y desarrollar tareas de distinto tipo y de investigación. Más de 750 instalaciones están registradas en España para este fin.

85

¿PUEDEN LAS RADIACIONES NUCLEARES ALIVIAR LOS TRABAJOS RUTINARIOS DEL HOMBRE?

Las radiaciones nucleares son entes reales del mundo físico, que pueden ser utilizados en beneficio del hombre para mejorar su calidad de vida. De hecho, las radiaciones nucleares emitidas por los átomos radiactivos, dada la facilidad con que pueden ser detectadas, permiten utilizar dichos átomos como trazadores radiactivos de los elementos químicos a los que pertenecen, lo que conduce a su empleo en la visualización de los caminos que siguen los elementos en los sistemas físicos, químicos y biológicos en la naturaleza.

Así pues, los trazadores radiactivos permiten desentrañar los mecanismos de funcionamiento o de transformación del mundo material, ahorrando la paciente tarea de laboratorio que tendrían que realizarse mediante miles y miles de análisis para obtener un conocimiento semejante. Por ello, no resulta exagerado afirmar que, en los últimos cincuenta años, hemos más que duplicado el acervo de nuestros conocimientos actuales sobre el mundo físico, con ayuda de los trazadores radiactivos, que son el gran paradigma de la investigación científica de los sistemas materiales.

Pero las aplicaciones de los átomos radiactivos no se limitan exclusivamente a esta ampliación de nuestra capacidad perceptiva con el auxilio de un detector; los átomos radiactivos, confinados herméticamente, se

transforman en fuentes emisoras de radiaciones, cuya interacción con la materia nos aporta señales para medir propiedades de los objetos circundantes. Las radiaciones pueden atravesar los objetos opacos, sufriendo un debilitamiento en proporción a la materia que encuentran en su camino, o pueden ser reflejadas, dándonos información sobre la densidad del medio donde rebotan; o pueden excitar la emisión de otras radiaciones, características de los elementos presentes.

Estos fenómenos de interacción son el fundamento de multitud de aparatos empleados en el control automático de procesos de fabricación de productos laminares (papel, plástico, chapas metálicas, etc.), de recubrimientos metálicos sobre sustratos plásticos o sobre otros metales (cincado, cromado, plateado, etc.), de interruptores de nivel en depósitos de líquidos, etc. Mediante estos aparatos de control, las radiaciones nucleares no sólo ahorran al hombre trabajos rutinarios de control “en diferido” de los procesos industriales, sino que permiten realizar el control “en tiempo real” con todas las ventajas que ello supone para la productividad, el ahorro de materias primas, o la calidad de los productos.

En resumen, las radiaciones nucleares —partículas alfa, beta, neutrones y fotones gamma— ofrecen un amplio repertorio de posibilidades interactivas con la materia, de las cuales se derivan múltiples aplicaciones, ya sea ayudándose a detectar fenómenos imperceptibles ya sea “midiendo” por transmisión, reflexión o fluorescencia las propiedades materiales que “ve” la fuente radiactiva.

En España están registradas más de 700 instalaciones radiactivas que, junto con las médicas, producen cada año 40 m³ de residuos radiactivos de baja y media actividad.

86

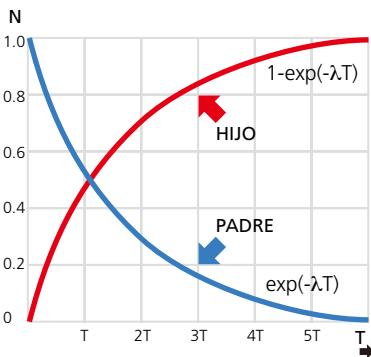
¿POR QUÉ LOS RELOJES ATÓMICOS PERMITEN FECHAR LOS EVENTOS GEOLÓGICOS?

En el pasado tuvieron lugar sucesos tales como la formación de las rocas, las erupciones volcánicas, las variaciones climáticas, glaciaciones, etc. Para reconstruir la cronología de este pasado geológico es necesario

disponer de un reloj que nos indique el tiempo transcurrido; lo cual presupone, a su vez, que en los materiales que el pasado nos ha legado — sean estos fósiles, rocas o minerales cristalinos— estén impresos signos indelebles del paso del tiempo.

Para este menester vienen como anillo al dedo los relojes atómicos, que son los únicos sistemas naturales capaces de proporcionar una lectura absoluta del tiempo transcurrido; y ello por una razón muy sencilla, porque los radionucleidos, que son la base de esta relojería de precisión, tienen una propiedad temporal invariante, a saber, que la tasa de desintegración de sus átomos es una constante; lo cual nos remite a esa ley exponencial decreciente con el tiempo para el número relativo de átomos radiactivos remanentes (radionucleido padre), y creciente para el de los átomos estables que se forman en la desintegración (nucleido hijo).

Para que un reloj sea útil debe marcar el tiempo correctamente, esto es, debe ser puesto en hora. Esta es la operación que hizo a su debido tiempo la naturaleza, cuando se consolidaron las rocas ígneas, se enfriaron las lavas volcánicas o se estratificaron los sedimentos; en ese momento se pusieron a cero los relojes. Pues el radionucleido padre quedó libre del hijo hasta entonces generado, y fue sólo a partir de este momento cuando el hijo empezó a acumularse en el seno de la red cristalina del mineral; acumulación que finaliza cuando determinamos mediante análisis destructivo la cantidad de radionucleido remanente y de hijo formado. Con estos datos el problema queda determi-



Mientras que el número N (relativo) de átomo del "padre" decrece exponencialmente, el del "hijo" crece de forma complementaria con el tiempo. (T =periodo de semidesintegración)

nado, siempre que se cumpla una condición previa: que el mineral se haya comportado como un sistema estanco y no haya perdido cantidad apreciable de materia, ni del padre ni del hijo. Sea, por ejemplo, el caso del potasio-40, que se desintegra con un período de 1.300 millones de años, para dar el gas noble argón-40 (estable); no cabe duda de que en el momento de la formación de un mineral de potasio (sea éste feldespato, granito, etc.), el reloj se puso a cero, porque el argón es un gas noble volátil que escapa, y sólo a partir de entonces se pudo acumular en la red cristalina del mineral, de tal modo que en el número de sus átomos en el momento del análisis, nos sirve de señal cuantitativa del tiempo transcurrido.

Naturalmente, el radionucleido impulsor de un reloj deberá tener “cuerda” suficiente para medir el tiempo que nos proponemos medir; y, por ello, recurriremos a utilizar relojes que tengan un período de semidesintegración acorde con la lejanía del acontecimiento; así, con carbono-14 (5.730 años) sólo podemos datar sucesos de finales del cuaternario, pero con otros radionucleidos, como el aluminio-26 (0,7 millones de años, abreviadamente, 0,7 Ma), yodo-129 (17 Ma), rubidio-87 (50.000 Ma), se puede fechar cualquier suceso de la evolución geológica de la Tierra.

Ahora bien, para que los relojes atómicos puedan ser utilizados, es necesario que alguna fuerza natural los haya creado sin el concurso del hombre; esta fuerza fue la explosión supernova que configuró el sistema solar, explosión que dio lugar a la formación de los radionucleidos primigenios, como el rubidio-87, potasio-40 y los isótopos del uranio y del torio, que todavía perduran. A esta clase de relojes habría que añadir otra, la basada en los radionucleidos cosmogénicos, formados en el bombardeo continuo de la Tierra por la radiación cósmica, que origina niveles constantes de radiactividad de carbono-14, y de otros radionucleidos de períodos relativamente cortos, en los seres vivos, en los sedimentos, etc. Cuando el ser vivo muere o el sedimento queda oculto, la actividad de los radionucleidos que contiene empieza a decrecer, dándonos su medida el paso del tiempo.

En resumen, los relojes atómicos han permitido al hombre construir esa ciencia de la naturaleza que es la geocronología, cuando ha aprendido a leer los registros temporales existentes en los objetos materiales.

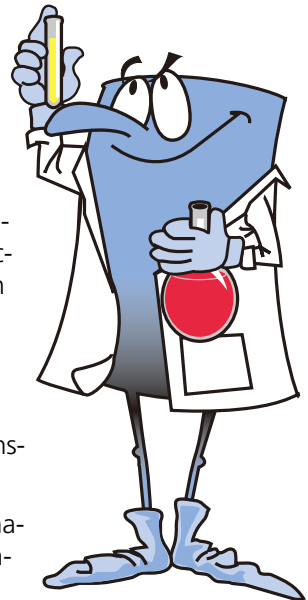
¿PUEDE UNA PEQUEÑA FUENTE RADIACTIVA SUSTITUIR A UN LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO?

Sí, en determinadas circunstancias; por ejemplo, en el control automático de impurezas en las materias primas aportadas a un proceso industrial, o en el análisis elemental de los estratos atravesados en un sondeo. El fundamento de estas aplicaciones analíticas se basa en la existencia de interacciones específicas de las radiaciones gamma y neutrónica con los átomos de los elementos que componen el medio material.

Y ¿cuáles son, cabe preguntarse, estas interacciones específicas? Son las que tienen lugar con las partículas atómicas cuyos niveles energéticos son característicos de cada elemento; tal es el caso de los electrones profundos de la corteza atómica, donde se generan los rayos X; o los nucleones (neutrones y protones) que forman el núcleo atómico, donde tienen lugar las reacciones nucleares, que generan fotones gamma u otras partículas.

Pues bien, a los electrones profundos se accede mediante interacciones de la radiación gamma —efectos fotoeléctrico y de Compton—, que arrancan electrones y crean cascadas de rayos X fluorescentes, al rellenarse los huecos corticales producidos. En cuanto a las reacciones nucleares, las radiaciones que entran con suma facilidad en el núcleo atómico son los neutrones, que provocan la emisión instantánea de radiación gamma u otras partículas.

En ambos casos, para realizar estas aplicaciones analíticas, se requiere una fuente de radiación —gam-



ma en el primer caso, y de neutrones, en el segundo— y un detector de la radiación resultante. Entre las aplicaciones analíticas de las fuentes cabe destacar el control de azufre (impureza) en crudos petrolíferos circulando por conducciones, o el de cenizas en hullas y lignitos sobre cintas transportadoras. En cuanto a las aplicaciones analíticas de las fuentes neutrónicas, su campo dominante son los análisis de la composición elemental de materiales situados en lugares inaccesibles, tales como los sondeos de prospección de hidrocarburos (hasta 7.000 metros de profundidad), de carbón (1.000 metros) o de productos metalíferos en general (más superficiales).

Mediante estas técnicas analíticas es posible evaluar los recursos de una cuenca minera y planificar su explotación; por ejemplo, en el caso carbonífero es posible precisar el contenido de impurezas de las vetas de hulla, su espesor y profundidad, su poder calorífico, etc. Naturalmente, en estas aplicaciones concurren otras muchas tecnologías avanzadas, de naturaleza electrónica e informática, sin las cuales no sería posible analizar la composición de estratos de subsuelo, situados a varios kilómetros de profundidad, desde la superficie de la corteza terrestre.

88

¿LA RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL SE FUNDA EN LOS MISMOS PRINCIPIOS QUE LA RADIOGRAFÍA MÉDICA?

La exploración radiográfica del cuerpo humano es de todos conocida, porque es la técnica física de mayor aplicación en medicina, y a todos nos han hecho radiografías de tórax, estómago, etc. En cuanto a la radiografía industrial, lo que se pretende es verificar, mediante rayos X o radiación gamma, la calidad de los componentes de los sistemas tecnológicos; se trata, como en el caso de la radiografía médica, de “ensayos no destructivos”, de modo que si la imagen radiográfica es satisfactoria, el componente pueda ser dado por bueno, sin haber sufrido merma alguna en su integridad física.

Los principios básicos en que se basan la radiografía médica y la radiografía industrial son, naturalmente, los mismos, pues las radiaciones X y gamma no distinguen en absoluto si se trata de materia viva perteneciente a un organismo o de materia inerte perteneciente a un componente metálico de un sistema. Quien es diferente es el especialista que solicita e interpreta la imagen radiográfica, que unas veces es un conocedor de la anatomía humana, y otras, un técnico especialista en construcciones metálicas; pero, ambos hacen uso del mismo principio fundamental, la diferencia de absorción que sufre todo haz de radiación en su trayectoria desde la fuente hasta el punto considerado del detector en función de la composición elemental y la cantidad de materia interpuesta.

Una diferencia, no obstante, es digna de mención: mientras que el paciente "va" a la sala de rayos X para la exploración médica, no siempre es posible llevar el componente del sistema tecnológico al laboratorio de radiografía industrial, por su inmovilidad; y entonces cobra excepcional importancia el uso de las fuentes gammagráficas, que son fácilmente transportables al lugar de emplazamiento del proyecto (oleoducto, puente, presa, central térmica o nuclear, etc.), para verificar in situ la calidad de su construcción. La movilidad de las fuentes, y su adaptabilidad a las más diversas circunstancias, son sus cualidades más apreciadas en las modernas aplicaciones tecnológicas.

89

¿CÓMO AYUDAN LAS RADIACIONES NUCLEARES EN LA RESTAURACIÓN DE OBJETOS ARTÍSTICOS?

Las radiaciones nucleares (en especial la radiación gamma) tienen dos propiedades características: por un lado, son ionizantes y forman radicales libres, lo que permite utilizarlas como catalizadores de polimerización cuando actúan sobre monómeros que contienen dobles enlaces (como los compuestos etilénicos, vinílicos, etc.); por otro lado, las radiaciones ionizantes tienen, a altas dosis, efectos biocidas, esto es, inhiben

la reproducción biológica y, como consecuencia, producen la muerte celular, de lo cual se deriva su uso como agentes esterilizantes.

En una obra de arte en estado de franco deterioro (trátase de una estatua de madera, un pergamino, etc.), nos encontramos con que lo primero que hay que hacer es esterilizarla, para erradicar insectos xilófagos, eliminar hongos, etc.; y, en segundo lugar, es necesario consolidarla de modo que el medio ambiente (humedad, compuestos químicos contaminantes de la atmósfera, etc.) no siga deteriorándola.



*Estatua de madera desinfectada
y consolidada por irradiación*

Pues bien, las propiedades anteriormente mencionadas permiten utilizar la radiación gamma para realizar ambas operaciones a la vez, la esterilización y la consolidación; para lo cuál lo único que se requiere es haber impregnado la obra de arte, después de su limpieza, con una disolución monomérica que, por efecto de la radiación se transformará in situ en una sustancia polimérica, la cual le dará consistencia y le protegerá de la posible acción nociva medioambiental.

90

¿CÓMO AYUDAN LAS TÉCNICAS NUCLEARES A DESCUBRIR FALSIFICACIONES ARTÍSTICAS O HISTÓRICAS?

El término de falsificación en arte o historia abarca una casuística muy amplia: autor, época, lugar, estilo, etc. Aquí nos ocuparemos de dos aspectos solamente: los relacionados con la atribución de autoría y con la datación histórica.

El recurso a las técnicas nucleares se basa en dos propiedades singulares de las radiaciones, que permiten:

- a) Realizar análisis no destructivos (o con mínima toma de muestras) para descubrir las “huellas digitales” de las obras; estas “huellas” están formadas por los elementos microconstituyentes que acompañan a la materia prima con que se realizó la obra de arte: mármol o bronce en escultura, arcilla en cerámica, silicato en vidrio, pigmentos en numismática, etc., y que varían según los autores y las épocas.
- b) Fechar la época de objetos históricos o arqueológicos, mediante el decaimiento radiactivo producido por el tiempo en determinados radionucleidos presentes en el sustrato material del objeto; tal es el caso del carbono-14, presente en su día en los vegetales y animales vivos en equilibrio con el nivel radiactivo natural del carbono, que luego darán lugar a restos fósiles de menor radiactividad. El carbono-14, sin lugar a dudas, es el radionucleido más importante (5.730 años de período de semidesintegración) para datar objetos relacionados con la historia del hombre; hay otros radionucleidos de aplicación más puntual, como el plomo-210 (de 20 años de período), que suele acompañar al albayalde utilizado en pinturas, o el tritio (de 12 años), que entra en el ciclo hídrico y permite datar añadas de vinos, etc.

Las técnicas nucleares han permitido depurar la autenticidad de las obras de arte y han permitido fundamentar la cronología de la evolución de las culturas humanas sobre una base objetiva.



¿SABES QUE BUENA PARTE DE LOS PRODUCTOS DE USO MÉDICO SE ESTERILIZAN MEDIANTE RADIACIONES NUCLEARES?

Las radiaciones ionizantes emitidas por los radionucleidos tienen la propiedad de inhibir la reproducción celular y, con ello, causar la muerte de microorganismos, insectos y, en general, de cualquier ser vivo, si la dosis de radiación aplicada es suficiente. Esta propiedad biocida de las radiaciones tiene muchas aplicaciones prácticas, pero entre todas destaca, por su importancia para la salud humana, la esterilización de productos de uso frecuente en clínica y en cirugía, donde se requiere un alto grado de asepsia; tal es el caso de productos como guantes, jeringuillas, gasas, sondas, cánulas, pipetas, recipientes, etc., y, en general, de cuantos productos son de “usar y tirar”.

La gran ventaja de esta técnica reside en el poder de penetración que tiene la radiación gamma, como la emitida por el cobalto-60, que puede producir la esterilización de los productos a dosis relativamente bajas (25 kGy) una vez envasados y listos para el suministro, lo que evita toda posibilidad de recontaminación por manipulaciones previas al uso.

Desde el punto de vista económico es importante, también, el hecho de que los productos puedan ser fabricados utilizando ambientes “normales”, en lugar de ambientes estériles (mucho más costosos), a sabiendas que la radiosterilización



Materiales de uso médico esterilizados por irradiación

posterior va a permitir alcanzar grados de asepsia mayores que los requeridos por la normativa sanitaria.

Las mencionadas ventajas han hecho que la radiesterilización haya alcanzado pleno desarrollo industrial en los países más avanzados, utilizándose para ello irradiadores de cobalto-60 (y, a veces, de cesio-137) de varios millones de curios, que permiten tratar anualmente unos 3 millones de m³ de productos listos para el suministro. Con ello, la radiesterilización ha desplazado al clásico procedimiento de la fumigación con óxido de etileno, que ya ha sido prohibido en muchos países (EE.UU., Japón, Australia, y ahora en la UE), por haberse descubierto que da lugar a residuos cancerígenos, que pueden afectar a los pacientes y al personal sanitario.

92

¿ES VERDAD QUE LA MAYORÍA DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS SE OBTIENEN UTILIZANDO RADIACIONES NUCLEARES?

Los plásticos, de uso tan extendido actualmente, son materiales formados por polímeros orgánicos, a los que se añade algún componente secundario para darles cuerpo (aditivos de carga) o para dotarlos de propiedades convenientes (coloración, flexibilidad, incombustibilidad, etc.); pero, la base esencial es, como se ha dicho, los polímeros orgánicos. Y, cabe preguntarse, ¿qué son estas sustancias? Son, simplemente, compuestos orgánicos de elevado peso molecular, cuya estructura está formada por la repetición de pequeñas unidades, a lo que alude la raíz “mer”, del griego meros, que quiere decir parte; la sucesiva unión de estas partes se conoce con el nombre de polimerización, y da lugar a cadenas lineales con miles de unidades (polímero).

En la naturaleza existen muchas sustancias poliméricas —celulosa, algodón, lana, proteínas y el propio DNA— cuya importancia no es necesario resaltar; pues bien, cuando el hombre descubrió la estructura de estas sustancias estuvo en condiciones de fabricarlas sintéticamente, diseñando incluso las propiedades que quería obtener. Desde este punto de vis-

ta, los polímeros obtenidos mediante el empleo de radiaciones nucleares (gamma, sobre todo) representan el grado más perfecto de consecución de materiales plásticos para cubrir los usos especiales que demanda la moderna tecnología.

El papel de las radiaciones tiene que ver con la reacción de polimerización en la medida en que crea radicales libres, que impulsan no sólo el crecimiento lineal de las cadenas poliméricas sino, también, la formación de enlaces intercatenarios (reticulación), que confieren a los polímeros propiedades especiales. Son ejemplos de materiales obtenidos por irradiación los siguientes:

- a) El caucho natural, obtenido por reticulación del látex sin adición de vulcanizantes (azufre, óxido de cinc, etc.) que dan residuos tóxicos; los productos son de tacto suave y se emplean en forma de guantes quirúrgicos, catéteres, etc.
- b) Los plásticos aislantes (cables eléctricos), que por reticulación adquieren mayor resistencia térmica y eléctrica, esenciales para las aplicaciones informáticas y de bajo voltaje.
- c) Los copolímeros por injerto, que insertan un polímero sobre un sustrato material cualquiera (papel, madera, metal u otro plástico); sus aplicaciones se extienden desde la resinificación de maderas, para usos de gran resistencia, a los recubrimientos de utensilios de cocina de teflón, o la provisión de prótesis y materiales biocompatibles.
- d) Finalmente, entre otras muchas aplicaciones, las nuevas formas galénicas de los medicamentos (enzimas, anticuerpos, etc.), confinándolos en membranas plásticas de las que difunden lentamente, proporcionando así una biodisponibilidad continua y regulada del fármaco.

Como se ve, las radiaciones nucleares tienen múltiples aplicaciones, y son muchos los materiales y utensilios que se fabrican sacando partido a sus propiedades positivas.



¿CÓMO CONTRIBUYEN LAS RADIACIONES NUCLEARES A HACER QUE DESAPAREZCA EL HAMBRE EN EL MUNDO?

Las radiaciones nucleares, especialmente la radiación gamma, tienen una aplicación de gran alcance para la humanidad, que es la conservación de alimentos por irradiación, en la que se saca partido a la propiedad esterilizante de las radiaciones (destrucción de microorganismos) y, también, al retardo enzimático de la maduración de frutas, inhibición de la germinación de semillas, etc.

La irradiación es un procedimiento más en el acondicionamiento de alimentos, que viene a sumarse al largo repertorio de los ya existentes —cocción, congelación, refrigeración, deshidratación, envasado al vacío, fermentación, salado, ahumado, adición de preservantes químicos, etc.— cada uno de los cuales tiene su ámbito propio de aplicación, si bien nada impide que se emplee una combinación de ellos, como en nuestro caso la irradiación de alimentos congelados, desecados o envasados al vacío, etc., o a la aplicación de los procedimientos culinarios normales a los alimentos irradiados; por otro lado, las autoridades sanitarias están prohibiendo el uso de los preservantes químicos (bromuro de metilo, dibromoetileno, etc.) cuyo hueco está siendo ocupado (o puede serlo en un futuro próximo) por la irradiación con fotones gamma del cobalto-60.

La irradiación de alimentos tiene actualmente dos vertientes principales de desarrollo; la reducción de las pérdidas de alimentos tras su recolección, y la mejora de la calidad sanitaria de los alimentos en general.

En cuanto a la reducción de pérdidas, pueden citarse los casos siguientes:

- la irradiación de fruta fresca, para eliminar insectos (mosca de la fruta, sobre todo), que causan verdaderos estragos en más de un centenar de variedades de frutas durante su almacenamiento, a la vez que se retrasa también el proceso de maduración, prolongando su vida comercial útil;

- la destrucción de larvas en cereales, legumbres y semillas, que devoran, en su fase de gorgojo, grandes cantidades de las reservas almacenadas;
- la inhibición de la brotación en bulbos y tubérculos (patata, cebolla, ajo, etc.), que detiene el proceso germinativo espontáneo de estos productos.

En los países del Tercer Mundo se estima que se pierden entre el treinta y el cincuenta por ciento de los alimentos recolectados.

La otra vertiente tiende hacia el cumplimiento de especificaciones microbiológicas, cada vez más estrictas, en los alimentos, que muchas veces son portadores de cantidades inaceptables de gérmenes patógenos (salmonella, trichina, campylobacter, etc.); también se aplica la irradiación a la higienización de especias (sobre todo, para la fabricación de embutidos), y en la preparación de dietas especiales para enfermos con escasas defensas inmunológicas. En cuestión de higiene alimentaria queda mucho camino por recorrer, incluso en los países más desarrollados, donde anualmente una de cada dos personas padece algún episodio infeccioso transmitido por vía alimentaria.

Como se deduce de lo dicho, la conservación de los alimentos por irradiación encierra un gran potencial para remediar el problema del hambre en el mundo, pero el nivel de desarrollo tecnológico y cultural del Tercer Mundo impide, hoy por hoy, beneficiarse de esta técnica, desarrollada por los países más avanzados, que son los que menos la necesitan.



¿SE INDUCE RADIOACTIVIDAD EN LA CONSERVACIÓN DE LOS ALIMENTOS POR IRRADIACIÓN?

En el sector de la alimentación, algunas autoridades nacionales, algunos empresarios industriales y algunos consumidores asocian la irradiación de alimentos con la inducción de radiactividad en los mismos, con la pérdida de poder nutritivo, y con posibles riesgos a largo plazo producidos por el consumo continuado de estos productos; esto, sin contar con la fuerte oposición de determinados grupos pseudoecologistas que creen que toda técnica relacionada con lo nuclear es intrínsecamente rechazable.

Por lo tanto, la irradiación de alimentos cuenta, de entrada, con un ambiente muy desfavorable para su despliegue industrial, paso imprescindible para mejorar la calidad de la alimentación en general y el problema del hambre en el mundo, en particular. Esta singular situación ha motivado, desde hace años, el desarrollo de extensos planes de investigación sobre alimentos irradiados, coordinados por las Organizaciones de las Naciones Unidas —FAO, OMS, OIEA, y la Comisión del “Codex alimentarius”— en virtud de su doble misión, tanto de promover el desarrollo como de remediar los problemas más urgentes en las poblaciones más desfavorecidas.

El problema de la inducción de radiactividad hay que reconocer que tiene un remoto fundamento científico, que se junta con una actitud de desconfianza radicalizada hacia los científicos y las instituciones oficiales. En efecto, qué duda cabe, que irradiando alimentos, o cualquier otro material, con radiaciones dotadas de suficiente energía induciremos reacciones nucleares, y que éstas producirán átomos radiactivos. Por ello, se especifican en los procedimientos de “buena práctica”, autorizados por la Comisión del “Codex alimentarius”, que:

- a) La radiación gamma, utilizada en la irradiación de alimentos, deberá tener energía inferior a 5 MeV, lo que garantiza la ausencia de reacciones nucleares en los elementos componentes de los alimentos.

b) Los electrones acelerados, que se emplean como alternativa, deberán tener energía inferior a 10 MeV, porque tales electrones no pueden inducir —indirectamente, a través de la radiación gamma de frenado— reacciones nucleares en proporción significativa.

Por lo tanto, las ciencias nucleares y las instituciones reguladoras han previsto las salvaguardias tecnológicas necesarias para prevenir la inducción de radiactividad; es más, basta con que la radiación gamma utilizada proceda de fuentes isotópicas (como el cobalto-60), para que las condiciones previstas se cumplan automáticamente, porque no hay radionucleidos que emitan fotones gamma por encima de unos 3 MeV.

Actualmente, medio centenar de países (los más desarrollados) han autorizado la irradiación de alimentos para el consumo público, condición ésta imprescindible para que pueda existir un comercio internacional de los mismos. En parte, también, esta lentitud de penetración comercial que citábamos al principio es debida al carácter enormemente conservador de la industria alimentaria, que no arriesga su dinero mientras no se hayan allanado todos los escollos reglamentarios y se haya informado correctamente al público, para que éste quede predispuesto para su aceptación.

95

¿POR QUÉ LOS ISÓTOPOS RADIACTIVOS SON TAN ÚTILES EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE LA NATURALEZA?

La naturaleza está constituida, en su versión más simple, por los átomos “representativos” de los elementos químicos que figuran en la Tabla periódica. Pero, como es bien sabido, cada elemento puede estar formado por varias clases de átomos isotópicos, esto es, por átomos que teniendo el mismo número atómico difieren en sus números másicos. Con ello resulta que el átomo “representativo” de un elemento es un átomo ficticio, que representa a una mezcla de isótopos; habitualmente esta mezcla es la de los isótopos estables (y radiactivos de larga vida, si

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

	1																	
s	1	1,00794 H 1s ¹ Hidrógeno											2					
2	3	6,941 Li [He]2s ¹ Litio	4	9,012182 Be [He]2s ² Berilio														
3	11	22,989770 Na [Ne]3s ¹ Sodio	12	24,3050 Mg [Ne]3s ² Magnesio														
4	19	39,0983 K [Ar]4s ¹ Potasio	20	40,078 Ca [Ar]4s ² Calcio	21	44,955910 Sc [Ar]3d ¹ 4s ² Escandio	22	47,867 Ti [Ar]3d ² 4s ² Titanio	23	50,9415 V [Ar]3d ³ 4s ² Vanadio	24	51,9961 Cr [Ar]3d ⁵ 4s ¹ Cromo	25	54,938049 Mn [Ar]3d ⁵ 4s ² Manganeso	26	55,845 Fe [Ar]3d ⁶ 4s ² Hierro	27	58,933200 Co [Ar]3d ⁷ 4s ² Cobalto
5	37	85,4678 Rb [Kr]5s ¹ Rubidio	38	87,62 Sr [Kr]5s ² Estroncio	39	88,90585 Y [Kr]4d ¹ 5s ² Itrio	40	91,224 Zr [Kr]4d ² 5s ² Circonio	41	92,90638 Nb [Kr]4d ⁴ 5s ¹ Niobio	42	95,94 Mo [Kr]4d ⁵ 5s ¹ Molibdeno	43	[98,9063] Tc [Kr]4d ⁵ 5s ² Tecnecio	44	101,07 Ru [Kr]4d ⁷ 5s ¹ Rutenio	45	102,90550 Rh [Kr]4d ⁸ 5s ¹ Rodio
6	55	132,90545 Cs [Xe]6s ¹ Cesio	56	137,327 Ba [Xe]6s ² Bario	71	174,967 Lu [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² Lutecio	72	178,49 Hf [Xe]4f ¹⁴ 5d ² 6s ² Hafnio	73	180,9479 Ta [Xe]4f ¹⁴ 5d ³ 6s ² Tántalo	74	183,84 W [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s ² Wolframio	75	186,207 Re [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s ² Renio	76	190,23 Os [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s ² Osmio	77	192,217 Ir [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s ² Iridio
7	87	[223,0197] Fr [Rn]7s ¹ Francio	88	[226,0254] Ra [Rn]7s ² Radio	103	[262,110] Lr [Rn]5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² Laurencio	104	[261,1089] Rf [Rn]5f ¹⁴ 6d ² 7s ² Rutherfordio	105	[262,1144] Db [Rn]5f ¹⁴ 6d ³ 7s ² Dubnio	106	[263,1186] Sg [Rn]5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ² Seaborgio	107	[264,12] Bh [Rn]5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ² Bohrio	108	[265,1306] Hs [Rn]5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ² Hassio	109	[268] Mt [Rn]5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ² Meitnerio
	119	[Uuo]8s ¹ Uue Ununenio	120	[Uuo]8s ² Ubn Unbinilio														
																f		
	*	57	138,9055 La [Xe]5d ¹ 6s ² Lantano	58	140,116 Ce [Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s ² Cerio	59	140,90765 Pr [Xe]4f ³ 5d ⁰ 6s ² Praseodimio	60	144,24 Nd [Xe]4f ⁴ 5d ⁰ 6s ² Neodimio	61	[144,9127] Pm [Xe]4f ⁵ 5d ⁰ 6s ² Prometio							
	+	89	[227,0277] Ac [Rn]6d ¹ 7s ² Actinio	90	232,0381 Th [Rn]5f ⁰ 6d ² 7s ² Torio	91	231,03588 Pa [Rn]5f ² 6d ¹ 7s ² Protactinio	92	238,0289 U [Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ² Uranio	93	[237,0482] Np [Rn]5f ⁴ 6d ¹ 7s ² Neptunio							

Número atómico: 74
Peso atómico a, b: 183,84
Símbolo: W
Nombre: Wolframio
Configuración electrónica: [Xe]4f¹⁴5d⁴6s²

Sólidos	Líquidos	Gases	Sintéticos
---------	----------	-------	------------

a Los pesos atómicos son los adoptados por la IUPAC, en 1995.
b Los valores entre paréntesis se refieren al isótopo más estable.

La realización de esta Tabla Periódica ha sido efectuada por el Dr. Pascual Román, miembro de la Comisión de Vizcaya de la RSAP-EAE y profesor de la UPV-EHU (2000).

										18																	
															2												
															4,002602												
															He												
															1s ² Helio												
															1												
										13	14	15	16	17													
										5	6	7	8	9	10	20,1797											
										B	C	N	O	F	Ne	2											
										[He]2s ² 2p ¹					[He]2s ² 2p ⁶												
										Boro					Carbono												
										Nitrógeno					Oxígeno												
										Fluór					Neón												
										13	14	15	16	17	18	39,948											
										Al	Si	P	S	Cl	Ar	3											
										[Ne]3s ² 3p ¹					[Ne]3s ² 3p ⁶												
										Aluminio					Silicio												
										Fósforo					Azufre												
										Cloro					Argón												
										10	11	12															
28	58,6934	29	63,546	30	65,39																						
Ni	Cu	Zn																									
[Ar]3d ⁸ 4s ²			[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹			[Ar]3d ¹⁰ 4s ²																					
Níquel			Cobre			Cinc																					
										31	32	33	34	35	36	83,80											
										Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	4											
										[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹					[Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶												
										Galio					Germanio												
										Arsénico					Selenio												
										Bromo					Criptón												
										46	106,42	47	107,8682	48	112,411												
										Pd	Ag	Cd															
[Kr]4d ¹⁰ 5s ⁰			[Kr]4d ¹⁰ 5s ¹			[Kr]4d ¹⁰ 5s ²																					
Paladio			Plata			Cadmio																					
										49	114,818	50	118,710	51	121,760	52	127,60	53	126,90447	54	131,29						
										In	Sn	Sb	Te	I	Xe	5											
										[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹					[Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³												
										Indio					Estaño												
										Antimonio					Telurio												
										Yodo					Xenón												
										78	195,078	79	196,96655	80	200,59												
										Pt	Au	Hg															
[Xe]4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s ¹			[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ¹			[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ²																					
Platino			Oro			Mercurio																					
										110	[269]	111	[272]	112	[277]												
										Uun	Uuu	Uub															
[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ²			[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ²			[Rn]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ²																					
Ununnilio			Ununbio																								
										113	[285]	114	[285]	115	[289]	116	[289]	117	[293]	118	[293]						
										Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	7											
[Uub]7p ¹			[Uub]7p ²			[Uub]7p ³			[Uub]7p ⁴			[Uub]7p ⁵															
Ununtrio			Ununcuadio			Ununpentio			Ununhexio			Ununseptio															
										62	150,36	63	151,964	64	157,25	65	158,92534	66	162,50	67	164,93032	68	167,26	69	168,93421	70	173,04
										Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb									
[Xe]4f ⁶ 5d ⁰ 6s ²			[Xe]4f ⁷ 5d ⁰ 6s ²			[Xe]4f ⁷ 5d ¹ 6s ²			[Xe]4f ⁹ 5d ⁰ 6s ²			[Xe]4f ¹¹ 5d ⁰ 6s ²			[Xe]4f ¹³ 5d ⁰ 6s ²												
Samario			Europio			Gadolinio			Terbio			Disprobio			Holmio			Erbio			Tulio			Iterbio			
										94	[244,0642]	95	[243,0614]	96	[247,0703]	97	[247,0703]	98	[251,0796]	99	[252,0830]	100	[257,0951]	101	[258,0984]	102	[259,1011]
										Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No									
[Rn]5f ⁶ 6d ⁰ 7s ²			[Rn]5f ⁷ 6d ⁰ 7s ²			[Rn]5f ⁷ 6d ¹ 7s ²			[Rn]5f ⁹ 6d ⁰ 7s ²			[Rn]5f ¹⁰ 6d ⁰ 7s ²			[Rn]5f ¹¹ 6d ⁰ 7s ²			[Rn]5f ¹³ 6d ⁰ 7s ²			[Rn]5f ¹⁴ 6d ⁰ 7s ²						
Plutonio			Americio			Curio			Berquellio			Californio			Einstenio			Fermio			Mendelevio			Nobelio			

los hay) con que se presenta el elemento en la naturaleza, pero ello no excluye que el mismo elemento se pueda presentar con gran variedad de composiciones isotópicas distintas, sobre todo, después de que el hombre aprendiera a enriquecer isotópicamente los elementos químicos y a transmutarlos mediante las reacciones nucleares, creando radisótopos no existentes previamente en la naturaleza.

Cuando se quiere disponer de una nueva representación, más acorde con la existencia de los isótopos de los elementos, es necesario olvidarse de la simplicidad de la Tabla periódica y recurrir a la llamada Tabla nucleídica. De hecho, ahora conocemos unas 2.000 clases de átomos distintos (nucleidos); sólo unos 300 de estos nucleidos son estables, y con ellos la naturaleza ha conformado la composición isotópica de los elementos naturales; los 1.700 restantes son radiactivos (radionucleidos), y han sido creados por el hombre mediante la investigación y la tecnología nucleares. Estos radionucleidos son, obviamente, isótopos radiactivos de los elementos conocidos y puede afirmarse que no hay ningún elemento del que no se conozcan varios de estos isótopos.

La existencia de los isótopos radiactivos es de gran importancia empírica, y ha dado lugar a que todo elemento químico pueda presentarse en dos versiones; una, la "estable", formada exclusivamente por isótopos estables (valga la redundancia), y otra, la de "radielemento", en la que por lo menos uno de sus isótopos es radiactivo. Por supuesto, todo "radielemento" es efímero y se transforma con el tiempo en su forma "estable", pero, mientras esto sucede, el "radielemento" es, por identidad química, trazador del elemento "estable" correspondiente. Naturalmente, en aquellos casos de elementos que no tienen ningún isótopo estable, como el radio, uranio, torio, plutonio, etc., ellos mismos son permanentemente radielementos, que trazan de forma espontánea sus caminos en la naturaleza.

El "trazado" de los elementos químicos, en conclusión, mediante sus respectivos "radielementos" es un hecho de suma importancia, porque nos permite "visualizar" (con auxilio de un detector) los caminos que los elementos siguen en los sistemas físicos, químicos y biológicos en los que intervienen. El recurso a los isótopos radiactivos (desde hace varias décadas) ha tenido, por lo tanto, carácter paradigmático para la investigación científica de la naturaleza, en la medida en que ha permitido esclarecer la mayor parte de los mecanismos evolutivos o de transformación de los sistemas materiales.

¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS TRAZADORES RADIACTIVOS?

Todo isótopo radiactivo puede ser utilizado como trazador radiactivo del elemento químico al cual pertenece. La única condición exigible es que el isótopo radiactivo esté formando parte de la misma entidad química que el elemento en cuestión; ello obliga, en muchos casos, a realizar operaciones químicas específicas, que se conocen con el nombre de “marcado”, para conseguirlo. Hoy en día existen catálogos comerciales de compuestos marcados, como por ejemplo benceno con tritio sustituyendo al hidrógeno, o con carbono-14 sustituyendo al carbono estable; evidentemente, este benceno marcado se comporta del mismo modo que el benceno normal y se utiliza como su trazador radiactivo en múltiples problemas de investigación de química orgánica.

A continuación se citan algunos ejemplos del empleo de los trazadores radiactivos en distintas disciplinas:

- Agricultura: se pueden estudiar las relaciones nutriente-suelo-planta, con especial referencia a oligoelementos, abonos, insecticidas, etc.
- Biología: se pueden determinar pequeñísimas concentraciones de enzimas, hormonas, drogas, venenos, etc., mediante la técnica de radioinmunoanálisis (RIA), que hace uso de la especificidad de las reacciones antígeno-anticuerpo.
- Cronología: se pueden fechar acontecimientos geológicos e históricos, mediante el estudio de los radionucleidos que actúan como relojes atómicos.
- Farmacología: se puede estudiar el metabolismo de los fármacos, antes de autorizar su uso público, y de los metabolitos y reacciones secundarias a que dan lugar.



- Hidrología: se pueden medir caudales de ríos y de alimentación de turbinas, o fugas en pantanos, dinámica de sedimentos, etc.
- Medicina: se puede diagnosticar la enfermedad mediante el uso de radiofármacos que visualizan el estado funcional de órganos específicos: cerebro, tiroides, corazón, pulmón, esqueleto, etc., o localizando abscesos y metástasis.
- Minería: se puede medir la radiactividad natural del uranio, torio y potasio en los sondeos de prospección, lo que da información respecto a los minerales asociados a estos radielementos.

Como puede observarse, el empleo de los trazadores radiactivos proporciona valiosa información en todos los dominios de las ciencias naturales.

97

¿QUÉ ES EL ANÁLISIS POR ACTIVACIÓN?

Es una técnica de identificación y cuantificación de los elementos constituyentes de una sustancia, que se basa en la medida de los radionucleidos que se forman (activación) al irradiar una muestra representativa de la misma.

Esta técnica puede practicarse utilizando diversas partículas elementales (fotones, protones, neutrones, partículas alfa, etc.), pero la modalidad que más importancia ha adquirido es la que utiliza los neutrones (activación neutrónica), por ser estas partículas muy abundantes en las proximidades del núcleo de un reactor o fáciles de obtener mediante fuentes neutrónicas, como las de americio-berilio, etc. Por otro lado, los neutrones son partículas constituyentes del núcleo atómico, que entran en él con suma facilidad, dando lugar a radisótopos emisores de radiación beta y, a veces, de radiaciones gamma, que es la que se usa habitualmente para la medida de los radionucleidos formados.

La característica fundamental del análisis por activación es su gran sensibilidad, por lo menos para determinados elementos, como el sodio, magnesio, cloro, potasio, manganeso, cobalto, uranio, etc., que pueden ser determinados aún en concentraciones muy bajas, inferiores a

una parte por millón (1 ppm), lo que sería difícil o imposible por otras técnicas.

Le sigue en importancia, como característica valiosa también, el hecho de que el análisis por activación pueda ser utilizado como ensayo no destructivo, conservando el objeto analizado su integridad física, con la única salvedad de que un número ínfimo de sus átomos estables se han transformado en radiactivos; pero ello no tiene mayor importancia, porque la radiactividad inducida decae, por lo general, muy rápidamente y el objeto recobra en poco tiempo su condición estable original.

Entre las aplicaciones específicas del análisis por activación cabe destacar la cuantificación de impurezas en los materiales tecnológicos (control de calidad) y de elementos microconstituyentes en objetos valiosos (artísticos, históricos, etc.), para identificar su origen o época, y en meteoritos y rocas extraterrestres, en búsqueda de conexiones cosmoquímicas

98

¿QUÉ SON LOS GENERADORES ISOTÓPICOS DE ELECTRICIDAD?

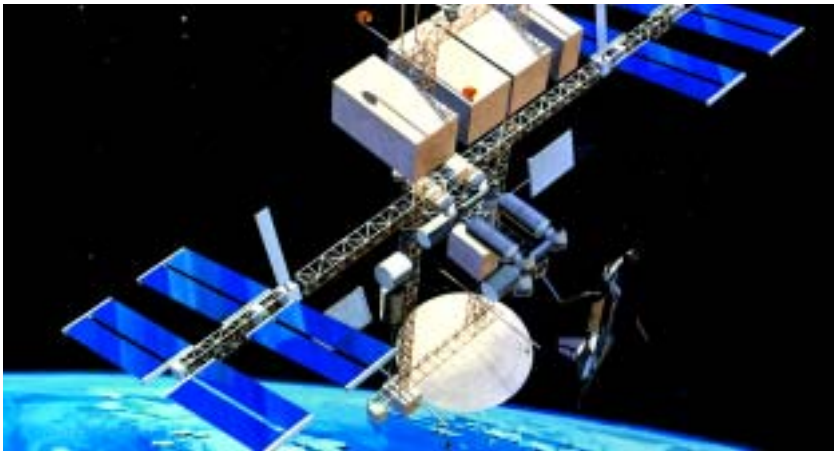
Son artificios que contienen un radionucleido, herméticamente confinado en una cápsula metálica, cuyas radiaciones son absorbidas íntegramente en las paredes de la misma: por lo tanto, la cápsula es equivalente a una pequeña fuente de calor, ya que ésta es la forma en que se manifiesta finalmente la energía de las radiaciones. A esta fuente calorífica se acopla un circuito formado por termopares —entre un punto caliente y otro frío (efecto de Peltier)— para generar una corriente eléctrica, como la de una pila galvánica, pero de mucha mayor duración, si el radionucleido es de período largo.

Los radionucleidos que se emplean son siempre emisores alfa, porque esta radiación se detiene en las primeras micras de las paredes de la cápsula (habitualmente, de acero inoxidable). Se usan, preferentemente, el plutonio-238, de 88 años de período de semidesintegración, y el curio-244, de 18 años, que pueden proporcionar potencias eléctricas del orden

del vatio por gramo de material radiactivo confinado, durante varios años.

Las aplicaciones de los generadores isotópicos, que como se ve proporcionan potencias muy pequeñas, se reservan para usos muy especiales, como:

- a) Marcapasos, implantados subcutáneamente para regular el ritmo cardíaco, requiriéndose potencias muy pequeñas, del orden de los microvatios; están siendo desplazados modernamente por las baterías de litio de larga duración (10 años).
- b) Pilas de uso remoto, reducida potencia (vatios), para alimentar aparatos de observación y transmisión de señales en lugares, terrestres o marinos, inaccesibles (sin mantenimiento posible).
- c) Las pilas de navegación espacial, de potencia en el orden de los kilovatios, para alimentar la instrumentación de satélites terrestres y de sondas planetarias; en este caso las pilas se referencian con las siglas inglesas SNAP-X de Space Nuclear Auxiliary Systems, seguidas de X (un número entero), que si es impar indica que la energía procede de un generador isotópico, y si es par, de un pequeño reactor nuclear. Con los SNAPs se ha explorado el sistema solar —misiones Apollo, Pioneer, Voyager, etc.— y, en algunos casos, se han depositado pequeños observatorios en los planetas próximos, que transmiten información a la Tierra.



Los satélites de comunicación y las sondas espaciales pueden usar la energía de baterías isotópicas de larga vida

¿CUÁNDO SE FORMÓ LA TIERRA?

Desde un punto de vista provinciano del universo, cual pueda serlo el de un habitante de un planeta del sistema solar, el tiempo cósmico se divide en dos grandes tramos: la etapa presolar, que se corresponde con el tiempo transcurrido desde que tuvo lugar aquel fantástico estallido originario, el Big Bang, por el que se creó un universo de galaxias en expansión; y la etapa solar, en la que una pequeña parte de la materia de nuestra galaxia —la Vía Láctea— se separó y concretó en el Sol, los planetas y los meteoritos.

La etapa solar se considera, a su vez, que tiene dos partes: una, el intervalo de transición entre el estado nebuloso inicial y la formación de los compuestos químicos que constituye los planetas y meteoritos, a la que se le asigna una duración de unos 100 millones de años; y otra, desde el final del intervalo de transición hasta nuestros días, que es el lapso de tiempo que constituye la edad de la Tierra.

En este relato falta todavía por referir un evento muy importante conocido con el nombre de “Último minuto” de la nucleosíntesis, en el que se formaron por última vez elementos químicos de número atómico elevado, que luego pasarían a formar parte de la materia de nuestro sistema solar; este “Último minuto” de la creación de elementos tuvo lugar justamente antes de iniciarse el intervalo de transición, y fue promovido, con casi plena seguridad, por una explosión supernova —etapa postrera de la nucleosíntesis estelar— como las que ahora observan nuestros astrónomos en otras galaxias del universo. Pues bien, en este “Último minuto” se pusieron en marcha los relojes atómicos, con los cuales se ha podido medir el intervalo de transición y la edad del sistema solar, considerada ésta común para todos los componentes y, por lo tanto, equivalente a la edad de la Tierra, que se ha determinado que es de unos 4.550 millones de años.

¿CÓMO SE HA DETERMINADO LA EDAD DE LA TIERRA?

La edad de la Tierra se ha medido utilizando los relojes atómicos contenidos en los materiales más primitivos del sistema solar a los que hemos tenido acceso, como son:

- a) las rocas terrestres más antiguas;
- b) las rocas lunares traídas por americanos y soviéticos; y
- c) los meteoritos que la Tierra intercepta en su deambular alrededor del Sol.

Dos han sido las clases de relojes utilizados: unos, con “poca cuerda”, que se pararon mientras transcurría el intervalo de transición y otros, con “muchísima cuerda”, que han llegado en marcha hasta nuestros días. Los prototipos de estos relojes son los siguientes:

El reloj de yodo-129, que impulsado por este radionucleido decae con un período de 17 Ma a xenón-129 (estable), y que permite medir lapsos de



tiempo del orden de los cien millones de años. Las lecturas de este reloj pueden hacerse en los meteoritos que, por ser cuerpos celestes muy pequeños, se enfriaron inmediatamente después de su formación; así se ha observado por el xenón-129 acumulado, que todos los meteoritos se formaron durante el intervalo de transición, unos, como el meteorito Allende, en el inicio mismo del intervalo, y otros, como el meteorito Guareña (por citar sólo nombres hispánicos) unos 100 millones de años después (como más tarde). En el interin de la transición se piensa que se formaron también los planetas, por acreción gravitatoria de pequeños asteroides; pero esto ha sido conocido, en parte, con el concurso de los relojes de “muchu cuerda”, cuyo prototipo se cita a continuación.

El reloj de rubidio-87, que impulsado por este radionucleido decae, con un período de unos 50.000 millones de años, a estroncio-87 (estable), el cual se acumula en todo mineral que contenga rubidio; los datos aportados por diversos meteoritos confirman la linealidad de esta acumulación temporal de estroncio-87, lo que permite extrapolar los resultados al tiempo “cero”, del inicio del intervalo de transición. Ello ha sido ratificado haciendo uso de otro reloj de la misma clase, el de uranio-238, que decae, con un período de 4.507 millones de años, para dar plomo-206 (estable).

En resumen, utilizando distintos relojes atómicos, ha sido posible determinar que la edad de la Tierra (y del sistema solar en su conjunto) es de 4.550 millones de años, y que su formación requirió un intervalo de transición, entre la nébula galáctica y la concreción de los planetas de unos 100 millones de años.

101

¿QUÉ FUNCIÓN CUMPLEN LOS DETECTORES DE RADIACIÓN?

Es bien sabido que el hombre no tiene capacidad perceptiva para las radiaciones alfa, beta, gamma, neutrónica, etc.; por lo tanto, para el “hombre de la calle” todo ocurre como si las radiaciones nucleares no

existieran. Los detectores de radiación son artificios creados para suplir esta carencia sensorial mediante la transformación de las interacciones de la radiación con la materia en señales perceptibles por el hombre, o por instrumentos (contadores) a los que encargamos que nos lleven cuenta de las mismas.

¿Qué interacciones se aprovechan con este fin? Las ionizaciones y excitaciones moleculares, que son las formas más elementales de la interacción radiación-materia; para ello se selecciona cuidadosamente el material sensible del detector, según la naturaleza de la radiación-problema, y la forma de medir tras la excitación. Estos tres requisitos —material, radiación y medición— dan lugar a un gran número de posibles detectores, de los cuales, los más utilizados, son los pertenecientes a las siguientes clases:

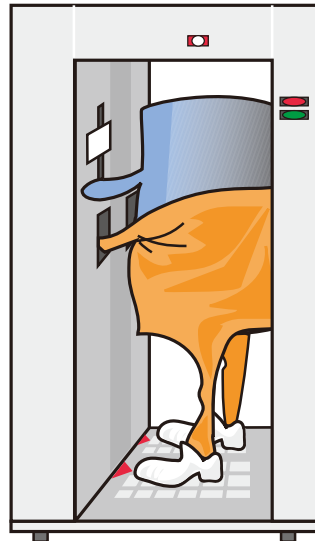
- a) Los detectores de ionización gaseosa, que, bajo la acción de un campo eléctrico, recogen las cargas formadas en un gas, dando lugar a una corriente (cámara de ionización) o a impulsos discretos (contadores proporcionales y de Geiger-Müller); estos detectores son útiles en la metrología de todas las radiaciones.
- b) Los detectores de centelleo, que, provistos de un fotomultiplicador, “ven” los destellos de luz emitidos por sustancias fosforescentes al paso de la radiación; hay cristales de centelleo, adecuados para la metrología de la radiación gamma, y líquidos de centelleo, para las radiaciones alfa y beta.
- c) Los detectores de estado sólido, que, dotados de cristales de elementos semiconductores —diamante, silicio o germanio—, se vuelven conductores a bajas temperaturas por efecto de la radiación, dando lugar a impulsos clasificables por tamaños, mediante analizadores multicanales; estos detectores son el fundamento de la espectrometría gamma de alta resolución, que permite analizar mezclas complejas de radionucleidos, sin necesidad de separaciones radioquímicas previas.

En esta breve descripción de las principales clases de detectores se habrá podido apreciar la función protésica que los detectores tienen para el hombre, dándole cobertura instrumental a su carencia sensorial en el ámbito de las radiaciones nucleares. Con el concurso de los detectores se ha construido todo el conocimiento del mundo subatómico que ahora poseemos.

¿SABES QUE LAS RADIACIONES NUCLEARES SE EMPLEAN EN LA MEJORA DE CULTIVOS AGRÍCOLAS?

Actualmente la alimentación humana está basada en el cultivo de unas pocas especies vegetales, que han sido el resultado de unos diez mil años de prácticas agrícolas, encaminadas a la selección de las variedades más adecuadas para satisfacer las necesidades alimentarias del hombre.

Se sabe, desde principios del siglo XX, que la variabilidad de las especies es consecuencia de las mutaciones génicas que se producen espontáneamente en las plantas; esto es, de pequeñas variaciones en alguno de los muchos genes —del orden de cien mil— que definen los caracteres de una especie vegetal. Estas mutaciones espontáneas tienen, no obstante, un ámbito muy limitado de aplicación, porque su frecuencia de aparición es muy baja, ya que son debidas a las radiaciones del fondo radiactivo natural o compuestos químicos mutágenos existentes en el medio ambiente. A ello se une el hecho de que las mutaciones son de naturaleza aleatoria y modifican los caracteres de las plantas al azar, tanto mejorándolos como empeorándolos. Las prácticas agrícolas tradicionales lo que hicieron fue, en definitiva, seleccionar pacientemente las variantes que iban apareciendo y que presentaban modificaciones de aspecto positivo, esto es, con mayor resistencia a las condiciones climáticas, a los gérmenes patógenos, a las plagas, etc., o con mayor contenido en sustancias tróficas (proteínas, grasas, azúcares, etc.).



Ahora que disponemos de un amplio repertorio de fuentes de radiación, el uso eficiente de las mutaciones nos invita a la inducción artificial de las mismas en las especies más prometedoras, con el fin de abreviar el lento proceso evolutivo natural, pasando de los milenios de la agricultura consuetudinaria a simples decenios; porque, si bien es fácil aumentar la tasa de mutaciones, es necesario pasar por la fase de expresión de las mismas, que son los cultivos de las plantas resultantes, sobre los cuales hay que realizar la selección de las variedades ventajosas, lo que conlleva unos años de experimentación.

Afortunadamente, hoy día son muchos los centros de investigación dedicados a la selección genética de semillas, y entre los años de 1970 y 1990 se han introducido más de un millar de cultivos, especialmente en el sector de los cereales, que cubren ahora grandes extensiones agrarias en los países con mayores problemas demográficos (China, India, Japón, etc.).

La selección genética de los cultivos agrícolas es la verdadera “revolución verde” que necesita la humanidad, de la cual estamos aún en sus inicios. El cultivo in vitro de plantas (reproducción clonal rápida), recientemente desarrollada y la biotecnología (transferencia dirigida de genes entre especies diferentes), que ha hecho sus primeros balbuceos, son los grandes pilares en que se apoyará el futuro desarrollo agroalimentario, cuyas posibilidades son todavía insospechadas.

103

¿SABÍAS QUE LAS RADIACIONES NUCLEARES SE EMPLEAN EN LA ERRADICACIÓN DE PLAGAS AGRÍCOLAS?

A pesar del prolongado empleo de potentes insecticidas durante décadas, todavía se pierden del orden del 20 por ciento de las cosechas agrícolas, destruidas por las plagas de insectos. Si a ello se une que las moscas y mosquitos son transmisores de enfermedades, es fácil concluir que los insectos son responsables de buena parte de las carencias alimentarias y de la calidad de vida de la especie humana. Afortunadamen-

te, en los últimos años se viene aplicando con éxito una técnica de esterilización de insectos para controlar las plagas más devastadoras.

La técnica en sí misma es muy sencilla: se producen masivamente insectos en “factorías”, que se esterilizan sexualmente con dosis del orden de 100 Gy de radiación gamma de cobalto-60; los insectos tratados se sueltan de forma programada en la naturaleza, donde se aparean, sin consecuencias, con los insectos nativos, con lo que la población de la plaga disminuye hasta el extremo de poder ser erradicada. A continuación se dan algunos ejemplos de aplicación de esta técnica:



Mosca del Mediterráneo

- a) La mosca del “gusano barrenero”, que pone los huevos en las heridas de los animales de sangre caliente, donde se desarrollan parasitariamente sus larvas, que penetran en los tejidos, produciendo gran sufrimiento e, incluso, la muerte del animal. La plaga ha sido erradicada ya de América del Norte, donde continúa en plena producción una factoría para controlar la plaga en la región caribeña. También se ha iniciado la lucha contra esta mosca en los países del Magreb, que sufrieron una contaminación accidental en 1988.
- b) La mosca tsetse, que es el vector de propagación del parásito causante de la enfermedad del sueño (trypanosomiasis), que afecta en el África tropical a una superficie mayor que la de 20 veces España y donde la ganadería está totalmente arruinada; el problema de la erradicación es muy complejo, no solo por su extensión sino porque la denominación “tsetse” comprende por lo menos 30 subespecies, que requieren el desarrollo de otras tantas variedades de insectos estériles, y un programa coordinado que implica a 36 Estados diferentes.
- c) La mosca de la fruta (o mosca mediterránea), que es una de las plagas más dañinas para los cultivos frutales a nivel mundial; parece que es originaria del sudeste africano, pero se ha propagado a la cuenca mediterránea y de aquí a otros continentes. La lucha con los insectos estériles, combinada con insecticidas, se ha iniciado ya en varios países con buenos resultados, pero la técnica está siendo perfeccionada en el sentido de eliminar las hembras en el proceso de crianza en las “factorías”, porque las hembras estériles siguen teniendo el instinto de po-

ner sus huevos en la pulpa de la fruta, con lo que se abren vías de infección para otros gérmenes patógenos, y, porque por otra parte, "distraen" inútilmente la atención sexual de los machos estériles.

- d) La oruga lepidóptera, que defolia grandes extensiones arbóreas, sobre todo en EE.UU.; en este caso se está ensayando una variante llamada F1 o de esterilidad heredada, consistente en la irradiación a menor dosis en la fase de mariposa, que si bien es suficiente para esterilizar a las hembras, solamente es eficaz en un 30 a 60 por ciento de los casos en los machos. Tras la suelta, las hembras que se aparean con machos nativos no dan lugar a la descendencia, y los machos que lo hacen con hembras nativas dan lugar a una descendencia reducida, cuyos individuos son, además, totalmente estériles; con lo que se interrumpe definitivamente la cadena reproductora.

Como se ha visto con los ejemplos reseñados, las radiaciones nucleares tienen aplicaciones beneficiosas para la erradicación de las plagas, haciendo innecesario el uso de insecticidas, que están produciendo una peligrosa contaminación química de la biosfera.



CAPÍTULO
8

CENTRALES ELÉCTRICAS





La electricidad es una forma de energía final cada vez más demandada por la calidad y versatilidad del servicio que presta. Pero la electricidad no es almacenable en términos industriales y debe ser producida al ritmo en que se demanda.

Las diferentes tecnologías que sirven para su producción deben responder a este condicionante y compatibilizarlo con los suyos específicos: necesidades de refrigeración, garantía de suministro de combustible, repercusión medioambiental, capacidad de seguimiento de la demanda, economía, ...

Se trata de producir la energía eléctrica más segura, fiable, limpia, de calidad y económica.

104

¿QUÉ ES UNA CENTRAL ELÉCTRICA?

Una central eléctrica es una instalación capaz de convertir la energía mecánica, obtenida mediante otras fuentes de energía primaria, en energía eléctrica.

En general, la energía mecánica procede de la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un embalse; de la energía térmica suministrada al agua mediante la combustión del carbón, gas natural, o fuelóleo, o a través de la energía de fisión del uranio. Esta energía (en forma de agua que cae desde un nivel superior o de vapor de agua o gas de combustión a alta presión) impulsa los rodetes de una turbina.

Para realizar la conversión de energía mecánica en eléctrica, se emplean unas máquinas denominadas generadores eléctricos o alternadores, que constan de dos piezas fundamentales: el estátor y el rotor. El estátor es un

cilindro metálico hueco en forma de cañón, cuya superficie interior dispone de ranuras que alojan un bobinado de cobre interconectado. El rotor es un eje macizo, también metálico, que se aloja con capacidad de giro en el interior del estátor y cuya superficie también dispone de ranuras que alojan otro bobinado de cobre interconectado que actúa como un electroimán cuando se les aplica una pequeña corriente eléctrica continua proveniente de un tercer equipo exterior llamado excitatriz. La turbina, el alternador y la excitatriz están alineados y comparten el mismo eje de rotación. Cuando el rotor gira a la velocidad de 1.500 ó 3.000 rpm (necesaria para generar con frecuencia de 50 Hz con la que se trabaja en Europa), impulsado por el eje que comparte con la turbina, se produce una corriente inducida en los hilos de cobre del interior del estátor. Estas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz, capaz de proporcionar energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él.



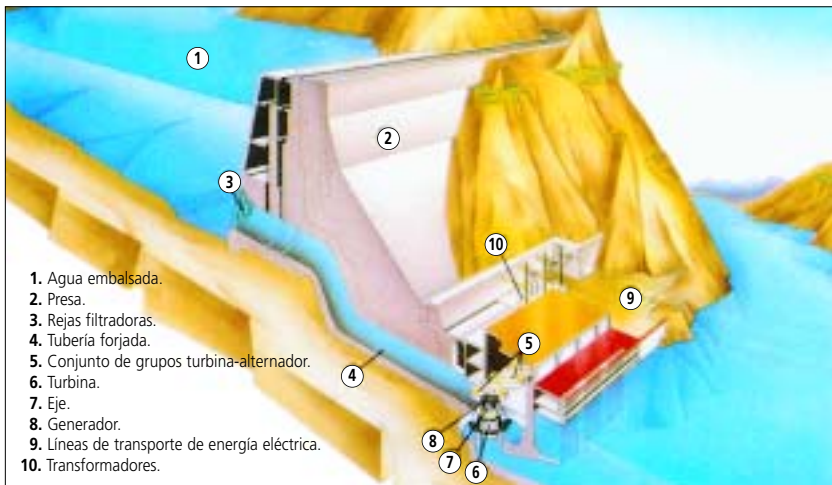
Esta energía eléctrica generada se envía a través de una red de líneas eléctricas hasta los lugares de consumo. A la salida de la central eléctrica, la tensión es de 110 kV, 220 kV o 380 kV; es decir, mediante un transformador se obtiene una alta tensión, para que las pérdidas en el transporte sean mínimas. Después, en los lugares de consumo, se vuelve a transformar, mediante otros transformadores, a las bajas tensiones conocidas de 380 V y 220 V, que son las que usualmente empleamos en nuestros equipos y aparatos.

105

¿QUÉ ES UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA?

Una central hidroeléctrica es aquella en la que la energía potencial del agua almacenada en un embalse se transforma en la energía cinética necesaria para mover el rotor de un generador, y posteriormente transformarse en energía eléctrica.

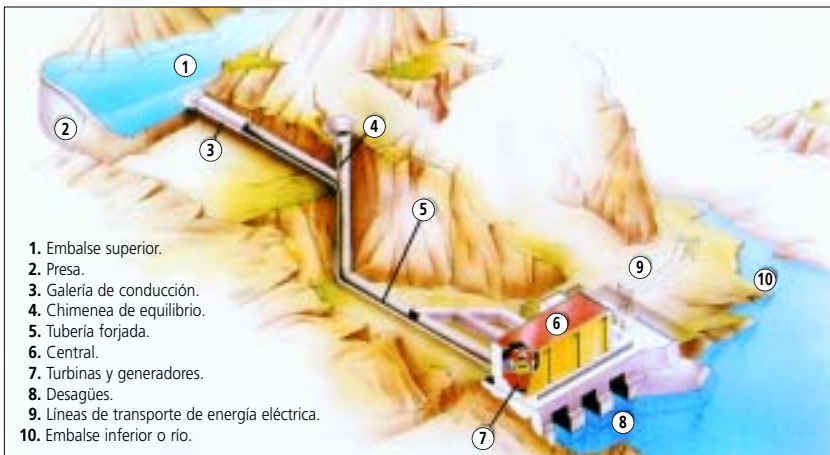
CORTE DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA



Las centrales hidroeléctricas se construyen en los cauces de los ríos, creando un embalse para retener el agua. Para ello se construye un muro grueso de piedra, hormigón u otros materiales, apoyado generalmente en alguna montaña. La masa de agua embalsada se conduce a través de una tubería hacia los álabes de una turbina que suele estar a pie de presa, la cual está conectada al generador. Así, el agua transforma su energía potencial en energía cinética, que hace mover los álabes de la turbina.

Una central eléctrica no almacena energía, sino que su producción sigue a la demanda solicitada por los usuarios. Como esta demanda es variable a lo largo del día, y con la época del año, las centrales eléctricas pueden funcionar con una producción variable. Sin embargo, la eficacia aumenta si la producción es constante; para ello existe un camino para almacenar la energía producida en horas de bajo consumo, y usarla en momentos de fuerte demanda, mediante las centrales hidráulicas de bombeo. Estas centrales tienen dos embalses situados a cotas diferentes. El agua almacenada en el embalse superior produce electricidad al caer sobre la turbina, como antes se indicó, cubriendo las horas de fuerte demanda. El agua llega posteriormente al embalse inferior, momento en que se aprovecha para bombear el agua desde el embalse inferior al superior, usando la turbina como motor, si fuera reversible, o el alternador.

CORTE DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO



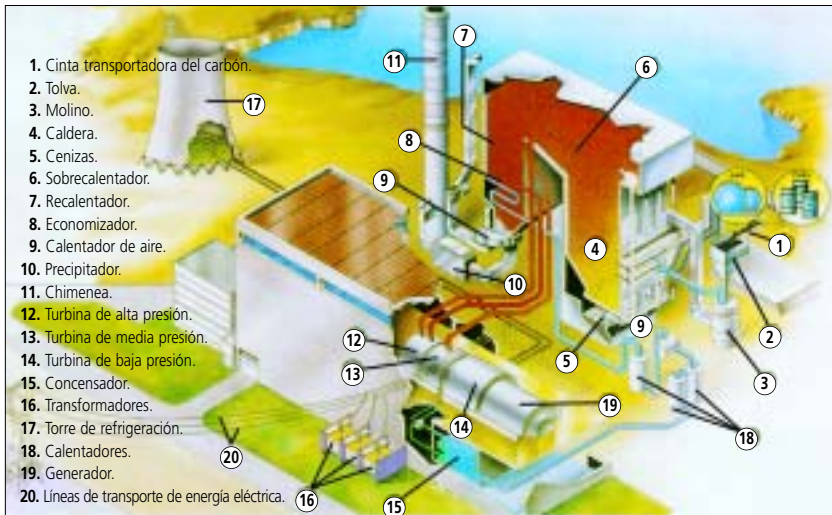
¿QUÉ ES UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA?

Una central termoeléctrica es una instalación en donde la energía mecánica que se necesita para mover el rotor del generador, y por tanto obtener la energía eléctrica, se obtiene a partir del vapor formado al hervir el agua en una caldera. El vapor generado tiene una gran presión, y se hace llegar a las turbinas para que en su expansión sea capaz de mover los álabes de las mismas.

Las centrales termoeléctricas consumen carbón, fuelóleo o gas natural. En dichas centrales la energía de la combustión del carbón, fuelóleo o gas natural se emplea para hacer la transformación del agua en vapor.

Una central termoeléctrica se compone de una caldera y de una turbina que mueve el generador eléctrico. La caldera es el elemento fundamental, y en ella se produce la combustión del carbón, fuelóleo o gas.

CORTE DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA CLÁSICA



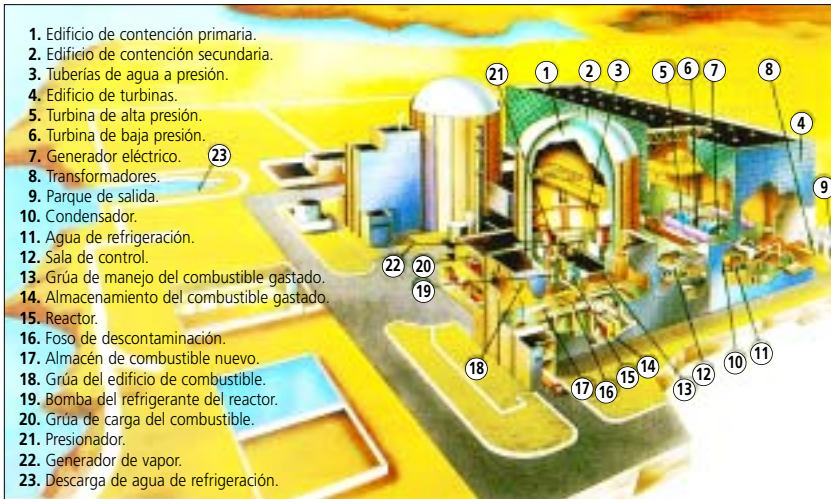
¿QUÉ ES UNA CENTRAL NUCLEAR?

Una central nuclear es una central termoeléctrica en la que actúa como caldera un reactor nuclear. La energía térmica se origina por las reacciones nucleares de fisión en el combustible nuclear formado por un compuesto de uranio.

El combustible nuclear se encuentra en el interior de una vasija herméticamente cerrada, junto con un sistema de control de la reacción nuclear y un fluido refrigerante constituyendo lo que se llama un reactor nuclear. El calor generado en el combustible del reactor y transmitido después a un refrigerante se emplea para producir vapor de agua, que acciona el conjunto turbina-alternador, generando la energía eléctrica.

La central se ha realizado con un diseño específico que prevé estructuras civiles adecuadas, sistemas duplicados que responden al fallo previsto de

CORTE DE UNA CENTRAL NUCLEAR



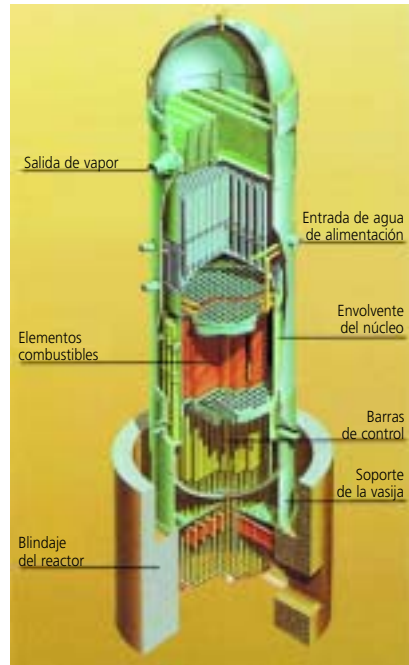
uno de ellos y coeficientes de sobredimensionamiento para resistir el sismo máximo esperable, proteger contra las radiaciones ionizantes y prevenir los accidentes posibles y mitigar sus consecuencias. Por este motivo, los edificios de una central nuclear en comparación con una convencional de similar potencia son mucho más robustos y más grandes para alojar los sistemas redundantes instalados.

108

¿QUÉ ES UN REACTOR NUCLEAR Y QUÉ ELEMENTOS LO CONSTITUYEN?

Un reactor nuclear es una instalación capaz de iniciar, mantener y controlar las reacciones de fisión en cadena, con los medios adecuados para extraer el calor generado. Un reactor nuclear consta de varios elementos, que tienen cada uno un papel importante en la generación de calor. Estos elementos son:

- El combustible, formado por un material fisionable, generalmente un compuesto de uranio, en el que tienen lugar las reacciones de fisión, y por tanto es la fuente de generación de calor.
- El moderador, que hace disminuir la velocidad de los neutrones rápidos producidos en la fisión nuclear, convirtiéndolos en neutrones lentos o térmicos. Este elemento no existe en los reactores denominados rápidos. Se emplean como materiales moderadores el agua, el grafito y el agua pesada.



- El refrigerante, que extrae el calor generado por el combustible del reactor. Generalmente se usan refrigerantes líquidos, como el agua ligera y el agua pesada, o gases como el anhídrido carbónico y el helio.
- El reflector, que permite reducir el escape de neutrones de la zona del combustible, y por tanto disponer de más neutrones para la reacción en cadena. Los materiales usados como reflectores son el agua, el grafito y el agua pesada.
- Los elementos de control, que actúan como absorbentes de neutrones, permiten controlar en todo momento la población de neutrones, y por tanto, la reactividad del reactor, haciendo que sea crítico durante su funcionamiento, y subcrítico durante las paradas. Los elementos de control tienen forma de barras, aunque el absorbente también puede encontrarse diluido en el refrigerante.
- El blindaje, que evita el escape de radiación gamma y de neutrones del reactor. Los materiales usados como blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.
- La vasija del reactor aloja el combustible, los elementos de control y el moderador, permitiendo el paso indispensable del refrigerante.

109

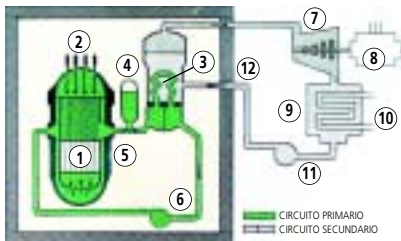
¿QUÉ TIPOS DE REACTORES NUCLEARES SE EMPLEAN EN LAS CENTRALES NUCLEARES?

Los reactores nucleares se clasifican, de acuerdo con la velocidad de los neutrones que producen las reacciones de fisión, en reactores rápidos y reactores térmicos. Por tanto, las centrales nucleoelectricas existentes tendrán un reactor rápido o un reactor térmico.

A su vez, los reactores térmicos se clasifican, de acuerdo con el tipo de moderador empleado, en reactores de agua ligera, reactores de agua pesada y reactores de grafito. Con cada uno de estos reactores está asociado generalmente el tipo de combustible usado, así como el refrigerante empleado.

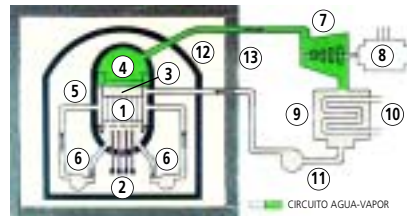
Los reactores más empleados en las centrales nucleoeeléctricas son:

- a. Reactor de agua a presión (PWR), que emplea agua ligera como moderador y refrigerante y óxido de uranio enriquecido como combustible. El refrigerante circula a una presión tal que el agua no alcanza la ebullición, y extrae el calor del reactor, que después lleva a un intercambiador de calor, donde se genera el vapor que alimenta a la turbina.
- b. Reactor de agua en ebullición (BWR), que emplea elementos similares al anterior, pero ahora el refrigerante, al trabajar a menor presión, alcanza la temperatura de ebullición al pasar por el núcleo del reactor, y parte del líquido se transforma en vapor, el cual una vez separado de aquél y reducido su contenido de humedad, se conduce hacia la turbina sin necesidad de emplear el generador de vapor.



ESQUEMA DE UNA CENTRAL NUCLEAR EQUIPADA CON UN REACTOR TIPO PWR (agua a presión)

1. Núcleo.
2. Barras de control.
3. Generador de vapor.
4. Presionador.
5. Vasija.
6. Bomba de refrigeración.
7. Turbina.
8. Alternador.
9. Condensador.
10. Agua de refrigeración.
11. Bomba de condensado.
12. Edificio de contención de hormigón.

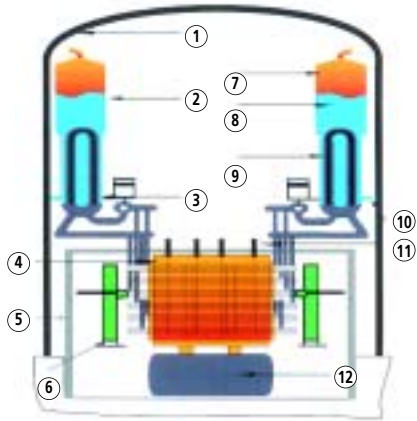


ESQUEMA DE UNA CENTRAL NUCLEAR EQUIPADA CON UN REACTOR TIPO BWR (agua en ebullición)

1. Núcleo.
2. Barras de control.
3. Separador y secador.
4. Vapor.
5. Vasija.
6. Bombas de recirculación.
7. Turbina.
8. Alternador.
9. Condensador.
10. Agua de refrigeración.
11. Bomba de condensado.
12. Contención primaria de acero.
13. Edificio de contención de hormigón.

Esquemas de reactores de agua ligera

- c. Reactor de agua pesada (HWR), que emplea agua pesada como moderador. Existen versiones en las que el refrigerante es agua pesada a presión, o agua ligera en ebullición. Puede emplear uranio natural o ligeramente enriquecido como combustible.
- d. Reactor de grafito-gas. Este tipo de reactores usa grafito como moderador y CO_2 como refrigerante. Mientras que los primeros reactores de este tipo emplearon uranio natural en forma metálica, los actuales denominados avanzados de gas (AGR) utilizan uranio enriquecido; y los denominados reactores de alta temperatura (HTGR), usan helio como refrigerante.
- e. Reactor de agua en ebullición (RBMK), moderado por grafito, desarrollado en la Unión Soviética, que consiste en un reactor moderado por grafito, con uranio enriquecido, y refrigerado por agua en ebullición. Este tipo de reactores no se ha empleado en Europa occidental.



**ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO
DE UN REACTOR DE AGUA PESADA**

1. Contención.
2. Generador de vapor.
3. Bomba de refrigerante.
4. Calandria.
5. Blindaje.
6. Máquina para recarga de combustible en operación.
7. Vapor para la turbina.
8. Agua ligera.
9. Agua pesada a presión.
10. Agua de alimentación.
11. Barras de control.
12. Tanque para agua pesada (D_2O).

¿QUÉ ES UN REACTOR RÁPIDO?

En este tipo de reactores no existe el elemento moderador para los neutrones y por tanto el flujo de neutrones cae en la zona de los neutrones rápidos. En estos reactores el combustible de la zona central,

formado por un óxido de uranio y plutonio, se rodea de una zona de óxido de uranio empobrecido, con un contenido de uranio-235 menor o igual al del uranio natural.

Con esta disposición, y si se usa un refrigerante que no produzca la moderación de neutrones (normalmente se emplea sodio líquido), se puede conseguir que en la capa de U-238 que rodea al combustible se genere más plutonio que el que se consume. De esta forma, al mismo tiempo que se está generando energía térmica, se está produciendo combustible en forma de Pu-239, que puede usarse en cualquier tipo de reactor, tanto rápido como térmico.

A este tipo de reactores también se los conoce por reactores reproductores, y su importancia es enorme, ya que permiten obtener un mejor aprovechamiento de los recursos existentes de uranio.

Hasta este momento existen muy pocos países que dispongan de centrales nucleoelectricas con este tipo de reactores. En primer lugar, Francia con el Superphenix de 1.200 MWe que ha funcionado hasta 1998, y ha sido la mayor central de estas características. Le sigue la antigua Unión Soviética e India, que tienen reactores de baja y media potencia en operación. En la actualidad, ha aumentado el interés por estos reactores y existen programas importantes de desarrollo en régimen internacional.



¿QUÉ TIPO DE REACTORES SE EMPLEAN EN LAS CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS?

En el período comprendido entre 1965 y 1973 se efectuó el diseño, construcción y puesta a punto de tres centrales, llamadas de la primera generación, cada una con una tecnología diferente. Estas centrales fueron José Cabrera, con un reactor de agua ligera a presión (PWR), Santa María de Garoña, con un reactor de agua ligera en ebullición (BWR), y Vandellós-I, con un reactor de grafito refrigerado por anhídrido carbónico.

En 1972 se contrataron nuevas centrales, las cuales se pusieron en funcionamiento a lo largo de los años ochenta. Estas son: Almaraz, con dos

reactores del tipo agua ligera a presión, Ascó con dos unidades del mismo tipo que las anteriores, y Cofrentes con un reactor de agua ligera en ebullición.

Posteriormente, se pusieron en funcionamiento las centrales de Vandellós-II y Trillo, ambas con un reactor de agua ligera a presión. En 1989 y 2006, respectivamente, han dejado de funcionar las centrales de Vandellós-I y José Cabrera.

Por tanto, en España, la tecnología adoptada en los reactores de las centrales nucleares españolas es del tipo de agua ligera, de diseño occidental. Solamente una central tuvo la tecnología de los reactores de grafito.

112

¿QUÉ ES UN REACTOR DE FUSIÓN NUCLEAR?

Un reactor de fusión es aquella instalación en la que tienen lugar reacciones nucleares de fusión en un combustible formado por isótopos de hidrógeno (deuterio y tritio), liberándose energía en forma de calor, para después transformarla en energía eléctrica.

Actualmente no existe ningún reactor de fusión que permita obtener energía eléctrica, aunque sí existen instalaciones de investigación en las que se estudian reacciones de fusión, así como la tecnología que se empleará en dichas centrales en un futuro.

Los reactores nucleares de fusión serán, en un futuro, de dos tipos: aquellos que empleen el confinamiento magnético, y los que empleen el confinamiento inercial.

Un reactor de fusión por confinamiento magnético está formado por:

- Una cámara de reacción, limitada por una pared metálica.
- Una cubierta de material formada por litio, que sirva tanto para extraer el calor de la pared metálica y para la producción de tritio, suponiendo que el combustible de la cámara de reacción sea deuterio-tritio.
- Unas grandes bobinas para generar el campo magnético.
- Una protección contra las radiaciones.

Un reactor de fusión por confinamiento inercial estará formado por:

- Una cámara de reacción de menor tamaño que la anterior, también limitada por una pared metálica.
- Una cubierta de litio.
- Unas penetraciones para facilitar el paso de la luz procedente de un láser, o las partículas de un haz de iones.
- La protección contra las radiaciones.

(Véase también la cuestión 56)



Esquema del proyecto ITER

113

¿QUÉ ES UNA CENTRAL SOLAR?

Es aquella instalación en la que se aprovecha la radiación solar para producir energía eléctrica. Este proceso puede realizarse mediante la utilización de un proceso fototérmico, o de un proceso fotovoltaico.

En las centrales solares que emplean el proceso fototérmico, el calor de la radiación solar calienta un fluido y produce vapor que se dirige hacia la turbina produciendo luego energía eléctrica. El proceso de captación y concentración de la radiación solar se efectúa en unos dispositivos llamados heliostatos, que actúan automáticamente para seguir la variación de la orientación del Sol respecto a la Tierra.

Existen diversos tipos de centrales solares de tipo térmico, pero las más comunes son las de tipo torre, con un número grande de heliostatos que reflejen la luz solar hacia un depósito que contiene un líquido. Para una central tipo de solo 10 MWe, la superficie ocupada por los heliostatos es de 20 ha.

Las centrales solares que emplean el proceso fotovoltaico hacen incidir la radiación solar sobre una superficie de un cristal de semiconductor, llamada célula solar, y producir en forma directa una corriente eléctrica por efecto fotovoltaico. Este tipo de centrales se están instalando en países donde el transporte de energía eléctrica se debería realizar desde mucha distancia, y hasta ahora su empleo es básicamente para iluminación y algunas aplicaciones domésticas.

114

¿QUÉ ES UNA CENTRAL EÓLICA?

Es una instalación en donde la energía cinética del aire al moverse se puede transformar en energía mecánica de rotación. Para ello se instala una torre en cuya parte superior existe un rotor con múltiples palas,

orientadas en la dirección del viento. Las palas o hélices giran alrededor de un eje horizontal que actúa sobre un generador de electricidad.

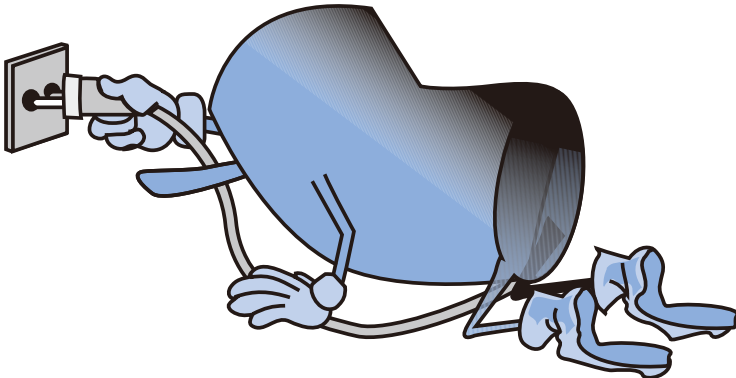
A pesar de que aproximadamente un 1% de la energía solar que recibe la Tierra se transforma en movimiento atmosférico, esta energía no se distribuye uniformemente, lo que limita su aprovechamiento.

Existen además limitaciones tecnológicas para superar potencias de un megavatio. Su funcionamiento está limitado a un rango de velocidades del viento y un parque eólico demanda extensiones de terreno grandes. Además, el número de horas que una central eólica está disponible para producir energía eléctrica está en el orden de entre el 20% y el 30% de las horas del año en España, valor bajo si se compara con los de las centrales térmicas y nucleares que consiguen cifras hasta del 93%. Otro aspecto que limita su importancia es que, debido a la intermitencia del viento, no garantiza potencias para abastecimiento de puntas de demanda.

115

¿QUÉ VIDA TIENEN LAS CENTRALES ELÉCTRICAS?

La vida de las centrales eléctricas depende por una parte de la competitividad económica de su explotación en la situación específica del mercado y por otra parte de la posibilidad del mantenimiento técnico de todos sus componentes. Este mantenimiento se refiere más bien a los



grandes equipos, por ejemplo la caldera en el caso de las centrales termoeléctricas, y al embalse en las hidroeléctricas que por su coste de sustitución o por las modificaciones técnicas necesarias pueden recomendar el final de vida de la instalación.

La vida útil desde el punto de vista económico de una central es de unos treinta años por término medio para las centrales térmicas, y de algo más para las hidráulicas y así se recoge en sus plazos de amortización. Sin embargo, si se realiza un adecuado programa de mantenimiento y los grandes equipos no precisan sustitución, esa vida se puede alargar.

Además, la central debe realizar un programa de inversiones que eviten su obsolescencia. Las centrales deben ser operativas en el entorno tecnológico existente y para ello deben realizar un proceso de actualización continua pues la innovación tecnológica deja obsoletos sistemas, equipos y componentes de forma que los costes y características de su operación la hagan inadecuada. También deben mantener un proceso de inspecciones periódicas de máximo detalle en sus áreas y componentes críticos.

En este sentido, en la industria nuclear se ha puesto en marcha el concepto de alargamiento de la vida, que mediante un mantenimiento sistemático y debidamente realizado, va a permitir a las centrales nucleares funcionar unos veinte años más de la vida esperada hasta ahora. Este plan también se ha trasladado a las centrales termoeléctricas de carbón.

116

¿QUÉ ES UN REACTOR NUCLEAR ASISTIDO POR ACELERADOR?

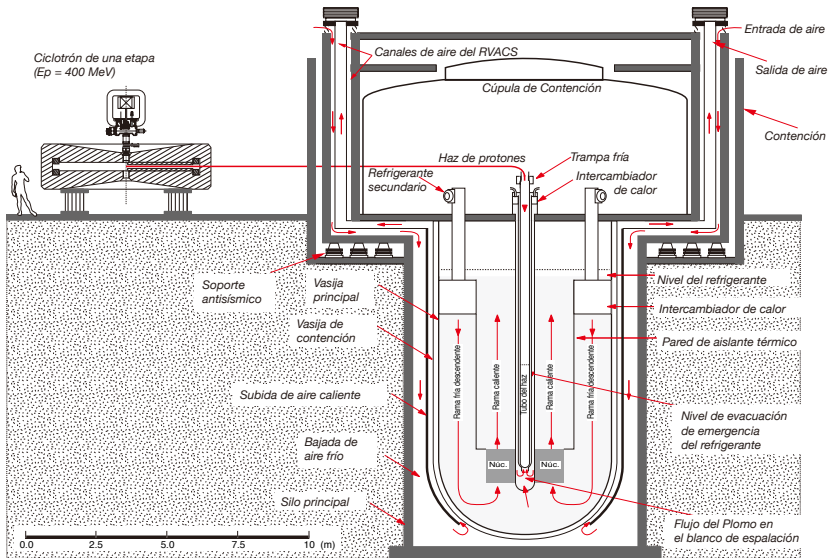
En los últimos años se han desarrollado aceleradores que permiten, con altas corrientes, acelerar partículas con una alta energía. Es posible usar corrientes de algunos mA en la aceleración de protones hasta varios GeV que, al interactuar con un material pesado, como por ejemplo plomo, producen neutrones de alta energía mediante reacciones de espalación. Durante la década de los ochenta se iniciaron varios proyectos como el ATW en Estados Unidos, y OMEGA en Japón, con el fin de

obtener altos flujos neutrónicos, superiores hasta los ahora obtenidos en los reactores térmicos y en los rápidos. El objetivo de estos proyectos es producir energía eléctrica y transmutar residuos de alta actividad.

Actualmente, los trabajos más desarrollados son los de Estados Unidos, Japón, Francia y la Unión Europea, destacando el concepto de amplificador de energía propuesto por el premio Nobel Carlo Rubbia, que en este momento puede considerarse como la base fundamental sobre el que se soportan el resto de los diseños. Este concepto, además de su uso como transmutador, permite la producción de energía, usando el ciclo del torio y plomo como refrigerante.

Cualquiera de los conceptos antes mencionados constan de dos elementos fundamentales:

- Un acelerador lineal de protones.
- Un sistema subcrítico quemador formado por plomo líquido que produce y utiliza el flujo de neutrones procedente de un acelerador que lleva los protones a producir reacciones de espalación con el plomo.



Esquema del Amplificador de Energía

¿CUÁLES SON LOS NUEVOS MODELOS DE REACTORES NUCLEARES?

La investigación actual en reactores nucleares denomina “reactores avanzados” a los nuevos diseños que surgen de recoger la experiencia de operación del parque mundial, la cual supera, ya, los 11.000 años-reactor. Esta cifra es la suma de los años de operación de cada uno de los reactores existentes.

Hasta la fecha se han distinguido dos épocas en el diseño de reactores a las que se han llamado generaciones. Así, la primera generación abarca la fase de comienzo comercial de esta tecnología con reactores de potencias inferiores a los 500 MW hasta mediados los años 60 del pasado siglo. La segunda generación transcurre hasta concluir ese siglo y en ella se construye el actual parque nuclear con aproximadamente 440 reactores y potencias que alcanzan los 1.400 MW.

En la tercera generación que cubre los últimos años se han mejorado los anteriores diseños con las soluciones definidas a partir de la experiencia operativa. Por esta razón se les denomina evolutivos. En este sentido se ha mejorado la economía de su construcción con sistemas modulares y la simplificación de los sistemas con una optimización en el número de equipos y soldaduras, se ha avanzado aún más en los sistemas de seguridad operativa y en la prevención y mitigación de accidentes catastróficos. A estas mejoras corresponden los modelos denominados “avanzados” de Westinghouse, AP-600 y 1000; de General Electric, ABWR 1000 y ESBWR y el europeo EPR y se pueden incluir en el término de reactores evolutivos.

En lo que se refiere a la operación, se reducen los residuos generados y la dosis del personal de mantenimiento, al optimizarse este proceso y se mejora la seguridad con sistemas pasivos de refrigeración de emergencia que actúan por diferencia de presiones y no con componentes activos. Además, se economiza en los procesos de quemado de combustible con ciclos más largos y mejores quemados.

Además en esta nueva generación de reactores se ha hecho un esfuerzo para simplificar el licenciamiento de forma que se reduzcan los tiempos de espera administrativos mediante la estandarización de diseños y la disminución de los plazos de construcción.

Como antes se ha citado, en el grupo de reactores avanzados se incorporan los diseños pasivos, que incorporan innovaciones relacionadas con sistemas de seguridad basados en circulación natural para refrigeración y en la gravedad para sistemas de fluidos de emergencia. Este concepto se caracteriza por su menor complejidad, lo cual facilita su manejo, y porque reduce aún más el posible error humano.

Por último está la denominada IV Generación con un horizonte establecido en 2030. Los aspectos que son objeto de investigación son: la refrigeración con metales líquidos, el trabajo con altas temperaturas de 900 °C, uso del torio como combustible, mejora de la obtención de energía del uranio y plutonio, desarrollo de reactores reproductores que multiplican los recursos de uranio por 50, etc.

Dos iniciativas se han desarrollado con este fin.

La Generación IV, nacida en 2000 por impulso de los Estados Unidos y que agrupa a grupos privados industriales y gubernamentales y en la que participan: Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea, Sudáfrica, Suiza y Gran Bretaña. Estos trabajos han concretado seis sistemas de reactores como objeto de investigación: refrigeración por sodio, de alta temperatura, refrigerados por agua supercríticos, reproductores refrigerados por plomo, por gas y por sales fundidas.

La iniciativa INPRO es una colaboración internacional surgida en el OIEA en 2001 que busca un reactor con mejoras en la seguridad, sostenibilidad, economía y medidas contra la proliferación. Participan en este empeño la UE como ente, Argentina, Canadá, China, Alemania, India, Holanda, Rusia, España, Suiza y Turquía.