

Prefacio	17
Introducción	19
Capítulo I	
Interacción de los protones y neutrones con la materia	21
1. Puntos clave	21
2. Introducción	21
3. Interacciones nucleares de los protones con la materia	23
3.1 Clasificación de los mecanismos de reacción	24
3.2 Influencia de la energía del proyectil	28
4. Interacción de los protones con los electrones atómicos	29
5. Poder de frenado para protones	30
6. Interacción de los neutrones con la materia	32
6.1 Dispersión de los neutrones con los núcleos	34
6.2 Absorción o captura de los neutrones por los núcleos	35
7. Referencias	35
Capítulo II	
Las radiaciones ionizantes en una instalación de protonterapia.	
Equipamiento utilizado	37
1. Conceptos clave	37
2. Equipo de protonterapia	37
2.1 Aceleradores en protonterapia	37
2.2 Ecuaciones de movimiento de un protón en un campo magnético ..	40

2.3	Imanes	41
2.4	Ciclotrones	43
2.5	Sincrotrones	46
2.6	Selección de energías	48
2.7	Transporte del haz hasta el paciente: línea de haz	50
2.8	“Gantry”	50
3.	Sistemas de administración del haz	52
3.1	Motivación: necesidad de la conformación para uso clínico	52
3.2	Conformación pasiva de haz mediante dispersión	52
3.3	Técnicas dinámicas de formación de haces: barrido activo	55
4.	Monitorización de la dosis	58
4.1	Cámaras monitoras	58
4.2	Calibración de las cámaras monitoras: relación entre el número de protones y las unidades de monitor	58
5.	Elementos auxiliares	59
6.	Sistema de imagen: “cone beam CT”, placas ortogonales, fluoroscopia, sistema de “gating”	59
7.	El TAC y el proceso de simulación	60
8.	Referencias	61
Capítulo III		
Pruebas de aceptación, estado de referencia inicial y mantenimiento del equipamiento		63
1.	Conceptos clave	63
2.	Introducción	63
3.	Pruebas de aceptación del equipo	64
4.	Estado de referencia inicial del equipo	65
4.1	Equipo de protones	65
4.2	Sistema de planificación (TPS)	66
4.3	Simulación CT	66
4.4	Equipos de medida	67
4.5	Red de registro y verificación	67
5.	Control de calidad	67

5.1. Programa de control de calidad del equipamiento	69
6. Programa de mantenimiento	69
7. Referencias	70
Capítulo IV	
Detectores de neutrones para la vigilancia radiológica ambiental y personal	71
1. Conceptos clave	71
2. Características de los campos neutrónicos en protonterapia	71
3. Magnitudes radiológicas	72
3.1 Magnitudes de protección o limitadoras	73
3.2 Magnitudes operacionales	76
3.3 Coeficientes de conversión fluencia – magnitud radiológica	79
4. Principios de detección	79
4.1 Detección activa	81
4.2 Detección pasiva	81
5. Detectores de neutrones para la vigilancia de área	83
5.1 Contadores proporcionales	84
5.2 Detectores de estado sólido pasivos	88
6. Detectores personales de neutrones	89
6.1 Detectores pasivos de estado sólido	90
6.2 Detectores activos de estado sólido: detectores electrónicos personales	93
7. Retos de la detección de neutrones	94
8. Referencias	95
Capítulo V	
Diseño de las instalaciones de protonterapia	99
1. Puntos clave	99
2. Introducción	100
3. Elementos de una instalación	101
3.1 Equipo y sistemas principales	101
3.2 Dependencias	102
4. Sistemas de seguridad	103
4.1 Sistema de control de accesos para impedir el uso no autorizado del equipo	104

4.2	Pulsadores de parada de emergencia	104
4.3	Pulsadores de búsqueda	104
4.4	Controles de acceso y enclavamientos de puertas	107
4.5	Señalizaciones luminosas	108
4.6	Sistemas de comunicación audiovisual	109
4.7	Protección contra incendios	109
4.8	Sistema de llaves personales	109
4.9	Sistemas integrados de seguridad diseñados y mantenidos por el fabricante	109
5.	Sistemas auxiliares	110
5.1	Sistema de ventilación	110
5.2	Sistema de refrigeración	110
5.3	Sistemas de control e informáticos	110
5.4	Otros sistemas auxiliares	111
6.	Sistema de vigilancia de la radiación: equipos de medida	111
6.1	Detectores fijos: vigilancia ambiental	111
6.2	Detectores portátiles	113
6.3	Dosímetros	114
6.4	Espectrómetro gamma	114
7.	Blindajes	114
7.1	Blindaje frente a los neutrones	114
7.2	Fuentes de neutrones: pérdidas del haz	116
7.3	Carga de trabajo: modelo del paciente	119
7.4	Blindaje de las salas principales	120
7.5	Métodos de cálculo	124
8.	Almacén de residuos y materiales activados	126
9.	Referencias	126
Capítulo V		
Reglamento de funcionamiento		129
1.	Puntos clave	129
2.	Introducción	130
3.	Personal de la instalación	131

4. Procedimientos	134
4.1 Control de accesos	134
4.2 Normas de trabajo en las distintas salas	136
4.3 Funcionamiento de la instalación	138
4.4 Transferencia de la operación del equipo entre el titular y la empresa de asistencia técnica	140
4.5 Operación diaria del equipo	142
4.6 Actuación ante avería del equipo o de sus sistemas auxiliares	142
4.7 Uso de los pulsadores de búsqueda en las distintas salas	143
4.8 Uso de los botones de emergencia	146
4.9 Normas para la protección radiológica de las trabajadoras expuestas ante un embarazo y/o lactancia	147
4.10 Gestión de residuos radiactivos sólidos y materiales activados	147
4.11 Gestión de residuos radiactivos líquidos	150
4.12 Descontaminación	151
5. Registro y archivo	153
6. Referencias	153
Capítulo VII	
Protección radiológica operacional	155
1. Puntos Clave	155
2. Introducción	157
3. Activación en protonterapia	158
3.1 Activación del propio equipo	159
3.2 Activación de equipos de medida, modificadores de haz y pacientes	159
3.3 Activación del aire y el agua	161
3.4 Ejemplo: Niveles de activación medidos en la instalación de la CUN	162
4. Riesgos asociados a la operación del equipo de protonterapia	163
4.1 Riesgo de Irradiación	163
4.2 Riesgo de Contaminación	164
5. Clasificación de zonas	164

6. Clasificación de los trabajadores expuestos	165
7. Vigilancia dosimétrica de los trabajadores expuestos	166
8. Vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos	168
9. Vigilancia radiológica ambiental	169
9.1 Medida de los niveles de dosis ambiental mediante el uso de dosímetros pasivos	169
9.2 Medida de los niveles de radiación con dosímetros activos	172
9.3 Medida de los niveles de radiación con detectores fijos	175
9.4 Monitorización de los niveles de activación en aire y agua con detectores fijos	180
10. Protección radiológica operacional del personal de asistencia técnica	181
10.1 Responsabilidades de la empresa de asistencia técnica	181
10.2 Organigrama del personal	182
10.3 Comunicación con el SPR	182
10.4 Licencias del personal	182
10.5 Dosimetría del personal	183
10.6 Clasificación del personal	183
10.7 Formación general y específica	183
11. Referencias	184
Capítulo VIII	
Verificación de una instalación de protonterapia	185
1. Puntos clave	185
2. Introducción	186
3. Pruebas preoperacionales	187
3.1 Ejemplo: Fase preoperacional en la CUN	189
4. Programa de mantenimiento y control de calidad	190
5. Programas de verificación	191
6. Verificación de los sistemas de seguridad	192
6.1 Alcance, frecuencia y responsable	192
6.2 Método y materiales empleados	193
6.3 Criterios de aceptación y de actuación en caso de no conformidad ..	194
6.4 Registro y archivo	194

6.5	Ejemplo: Verificación de los sistemas de seguridad en la CUN	195
7.	Verificación periódica de los blindajes	197
7.1	Alcance, frecuencia y responsable	197
7.2	Método y materiales empleados	197
7.3	Criterios de aceptación y de actuación en caso de no conformidad ..	198
7.4	Registro y archivo	198
7.5	Ejemplo: Verificación de blindajes en la CUN	199
8.	Calibraciones y verificaciones de los detectores	202
8.1	Alcance, frecuencia y responsable	202
8.2	Método y materiales empleados	202
8.3	Criterios de aceptación y de actuación en caso de no conformidad ..	204
8.4	Registro y archivo	205
8.5	Ejemplo: Verificación operacional de los detectores de neutrones en la CUN	205
9.	Otros programas de verificación	208
9.1	Equipo de protonterapia tras una intervención de mantenimiento ..	208
9.2	Hermeticidad de fuentes radiactivas encapsuladas	208
10.	Referencias	208
Capítulo IX		
	Riesgos radiológicos	211
1.	Puntos clave	211
2.	Introducción	211
3.	Metodología de análisis de riesgo	212
4.	Riesgos radiológicos de los pacientes	214
4.1	Flujo de trabajo del proceso clínico en Protonterapia	214
4.2	Peligros y riesgos del proceso radioterápico en Protonterapia	216
5.	Plan de emergencias	223
5.1	Línea de autoridad	223
5.2	Incidentes previsibles	223
5.3	Procedimientos de actuación	225
5.4	Procedimiento de notificación	226
5.5	Formación y mantenimiento del plan de emergencia interior	226

6. Simulacros de emergencia	227
7. Lecciones aprendidas	227
8. Referencias	229
Capítulo X	
Aspectos legales específicos en instalaciones de protonterapia	231
1. Puntos clave	231
2. Introducción	231
3. Directiva 2013/59/EURATOM por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes	232
4. Real Decreto 1217/2024: Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes	234
5. Real Decreto 1029/2022: Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes	234
5.1 Protección operacional de los trabajadores externos	240
6. Real Decreto 601/2019 sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas	242
7. Real Decreto 391/2025 por el que se establecen los criterios de calidad y seguridad de las unidades asistenciales de radioterapia	249
8. Real Decreto 192/2023 por el que se regulan los productos sanitarios ...	265
9. Publicaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica	265
10. Normativa aplicable a equipos y fuentes radiactivas utilizadas en protonterapia, tales como normas UNE y normas CEI	269
10.1 Normas de la AENOR	269
10.2 Normas de la CEI	270
11. Instrucción IS-18 del CSN sobre criterios notificación de sucesos e incidentes radiológicos	271
12. Guías de seguridad del CSN	274
13. Referencias	275

Capítulo XI

Aspectos administrativos específicos en instalaciones de protonterapia	277
1. Puntos clave	277
2. Introducción	278
3. Puesta en marcha de la instalación	278
3.1 Documentación	278
3.2 Otorgamiento	280
3.3 Cambios y modificaciones	281
4. Desmantelamiento y clausura	283
5. Inspección de instalaciones radiactivas	283
5.1 Acta de inspección	284
6. Archivo de documentos y registros en una instalación de protonterapia	285
7. Licencias y acreditaciones del personal	288
7.1 Solicitudes	289
7.2 Tramitación	289
7.3 Concesión	290
7.4 Renovación	290
7.5 Término de la vigencia	290
7.6 Suspensión temporal de las licencias	291
8. Obligaciones y responsabilidades del titular	292
9. Obligaciones y responsabilidades del personal	293
10. Diario de operación	295
10.1 Condiciones	295
10.2 Contenido	295
11. Informe anual al CSN	297
12. Otras autorizaciones	297
13. Instrucción IS-28 del CSN sobre especificaciones técnicas de funcionamiento que deben cumplir las instalaciones radiactiva de segunda y tercera categoría	299
14. Circular Formato y contenido estándar de la documentación de apoyo a la solicitud de instalaciones de protonterapia	299

15. Servicio de Protección Radiológica 307

16. Referencias 309