

RADIOFISICA HOSPITALARIA

TOMO 1

TEMA 0: MAGNITUDES, UNIDADES Y SÍMBOLOS.....	1
0.1 Sistema Internacional de unidades	3
0.1.1 Unidades SI básicas.	3
0.1.2 Unidades SI suplementarias.....	4
0.1.3 Unidades SI derivadas	4
0.1.4 Múltiplos y submúltiplos decimales.....	8
0.2 Símbolos de las magnitudes físicas	9
0.2.1 Cinemática	9
0.2.2 Dinámica	9
0.2.3 Termodinámica	10
0.2.4 Electromagnetismo	10
0.2.5 Constantes fundamentales	11
0.3 Errores en las medidas	12
0.3.1 Reglas para expresar una medida y su error.....	12
0.4 Tabla de equivalencias:.....	16
0.5 Algunas preguntas y recomendaciones.....	17
TEMA 1: FUNDAMENTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES	19
1.1 Introducción	21
1.2 Desintegración radiactiva.....	23
1.2.1 Ley exponencial de atenuación.....	23
1.2.2 Producción de radionúclidos.	32
1.2.3 Tipos de desintegración.	35
1.2.4 Series Radiactivas Naturales.	38
1.2.5 Aplicaciones cronológicas: Datación por carbono-14.....	40
1.3 Desintegración alfa.	42
1.3.1 Introducción	42
1.3.2 Sistemática de la desintegración a. Ley de Geiger-Nuttall.....	43
1.3.3 Teoría de la emisión alfa.	45
1.3.4 Momento angular y paridad.	49
1.4 Desintegración beta.	52
1.4.1 Introducción	52
1.4.2 Tipos de procesos.....	53
1.4.3 Teoría de Fermi de la desintegración β	56
1.4.4 Forma estadística de los espectros β	58
1.4.5 Reglas de selección: momento angular y paridad.	64
1.4.6. Semividas comparativas.	69
1.4.7 Emisión retardada de neutrones.....	72
1.4.8. Física del neutrino.....	73
1.4.9. Desintegración β inversa.	74
1.5 Desintegración gamma.	75
1.5.1 Introducción	75
1.5.2 Reglas de selección de momento angular y paridad	79
1.5.3 Conversión interna.	80
1.5.4 Fluorescencia de Resonancia Nuclear.....	82
1.6 Interacción de la radiación con la materia.....	85
1.6.1 Introducción.	85
1.6.2 Interacción de partículas cargadas con la materia.	86
1.6.3 Interacción de electrones rápidos con la materia.	108
1.6.4. Ley exponencial de atenuación.....	118
1.6.5 Interacción de los rayos γ con la materia.....	123

1.6.6 Interacción de neutrones.....	156
1.7 Dosimetría de la radiación.....	159
1.7.1 Magnitudes y unidades para la radiación ionizante.	159
1.7.2 Magnitudes radiométricas: Fluencia de partículas y fluencia de partículas.....	163
1.7.3. Coeficientes de interacción.....	164
1.7.4. Teoría de la cavidad Bragg-Gray.....	165
1.8 Algunas preguntas y recomendaciones.....	166
1.8.1 Algunas preguntas.....	166
1.8.2 Algunas recomendaciones.....	176
TEMA 2: FISICA CUÁNTICA	177
2.1. Introducción	179
2.2 Naturaleza atómica de La materia y la electricidad.	181
2.2.1 La hipótesis atómica.	181
2.2.2 Evidencias de la naturaleza atómica de la materia.....	181
2.2.3 Pesos atómicos y la Tabla Periódica de los elementos	183
2.2.4 La Teoría Cinética.	183
2.2.5 Tamaño de los átomos.....	184
2.2.6 La atomicidad de la carga eléctrica	185
2.2.7 Los rayos catódicos.....	185
2.2.8 El electrón.....	186
2.2.9 El experimento de Millikan y la cuantificación de la carga.....	187
2.3 Estructura atómica.....	188
2.3.1 Cargas atómicas positivas	188
2.3.2 La dispersión de rayos X y la cantidad de electrones de cada átomo.....	188
2.3.3 El modelo atómico de Thomson	190
2.3.4 Radioactividad	191
2.3.5 La dispersión de partículas a por los átomos y el fracaso del modelo de Thomson	192
2.3.6 El modelo de Rutherford y el núcleo atómico.....	193
2.3.7 La constante que está faltando.....	197
2.4 Radiación, fotones y la constante de Planck	199
2.4.1 Introducción	199
2.4.2 La teoría de Planck de la radiación de cuerpo negro	199
2.4.3 El postulado de Planck.....	201
2.4.4 El efecto fotoeléctrico	203
2.4.5 Teoría cuántica de Einstein del efecto fotoeléctrico.....	205
2.4.6 El efecto Compton.....	208
2.4.7 La emisión de rayos X	211
2.4.8 Creación y aniquilación de pares	213
2.4.9 La naturaleza dual de la radiación electromagnética	215
2.5 La teoría cuántica antigua.....	218
2.5.1 Introducción.	218
2.5.2 El espectro atómico.....	218
2.5.3 Los postulados de Bohr.....	220
2.5.4 Teoría de Bohr del átomo con un electrón	221
2.5.5 El espectro de líneas de rayos X.....	224
2.5.6 Refinamientos del modelo de Bohr	226
2.5.7 El principio de correspondencia	229
2.5.8 El experimento de Franck y Hertz.....	230
2.5.9 Constantes fundamentales y escalas de la Física Atómica	232
2.5.10 Crítica de la Teoría Cuántica Antigua	233

2.6. Propiedades ondulatorias de la materia.....	235
2.6.1 El postulado de Broglie.....	235
2.6.2 Algunas propiedades de las ondas prueba.....	236
2.6.3 El experimento de Davisson y Germer.....	238
2.6.4 Interpretación de la regla de cuantificación de Bohr.....	239
2.6.5 El principio de incertidumbre.....	240
2.6.6 Interpretación física de Heisenberg del principio de incertidumbre.....	243
2.6.7 La relación de incertidumbre entre la energía y el tiempo.....	244
2.6.8 El principio de complementaridad.....	245
2.7. La teoría de Schrödinger.....	248
2.7.1 Introducción.....	248
2.7.2 La ecuación de Schrödinger.....	248
2.7.3 Interpretación de la función de onda.....	250
2.7.4 La ecuación de Schrödinger independiente del tiempo.....	252
2.7.5 Cuantificación de la energía en la teoría de Schrödinger.....	253
2.7.6 Valores esperados y operadores diferenciales.....	256
2.7.7 Propiedades matemáticas de operadores lineales en espacios funcionales.....	258
2.8. El formalismo de la mecánica cuántica.....	266
2.8.1 Introducción.....	266
2.8.2 Propiedades de las funciones de onda y de las autofunciones de la energía.....	267
2.8.3 Normalización en una caja.....	267
2.8.4 Relaciones de conmutación.....	268
2.8.5 Autoestados de una variable dinámica.....	268
2.8.6 Mediciones simultáneas y operadores que conmutan.....	269
2.8.7 Las relaciones de incertidumbre de Heisenberg.....	271
2.8.8 Constantes del movimiento y ecuaciones del movimiento para operadores.....	271
2.8.9 El límite clásico.....	273
2.8.10 Representación coordenadas y representación impulsos.....	273
2.8.11 Transformaciones unitarias.....	275
2.9. Soluciones de la ecuación de Schrödinger.....	278
2.9.1 Introducción.....	278
2.9.2 La partícula libre.....	278
2.9.3 El potencial escalón.....	281
2.9.4 Penetración de una barrera de potencial.....	285
2.9.5 El oscilador armónico simple.....	289
2.10. Fuerzas centrales, momento angular y átomo de hidrógeno.....	293
2.10.1 Introducción.....	293
2.10.2 Propiedades del momento angular.....	293
2.10.3 Magnitud del momento angular.....	294
2.10.4 Traslaciones y rotaciones infinitesimales y sus generadores.....	295
2.10.5 Fuerzas centrales y conservación del momento angular.....	296
2.10.6 Energía cinética y momento angular.....	296
2.10.7 Reducción del problema de fuerzas centrales.....	297
2.10.8 Dependencia angular de las autofunciones.....	298
2.10.9 El problema de autovalores para L_z y la cuantificación espacial.....	299
2.10.10 Teoría elemental del efecto Zeeman.....	299
2.10.11 Autovalores y autofunciones de L^2	300
2.10.12 La ecuación radial.....	302
2.10.13 Estados ligados de átomos con un solo electrón.....	304
2.11. El espín.....	308
2.11.1 El momento angular intrínseco.....	308

2.11.2 La evidencia espectroscópica	308
2.11.3 La hipótesis de Uhlenbeck y Goudsmit.....	309
2.11.4 El experimento de Stern y Gerlach.....	310
2.11.5 El espín como una variable dinámica	313
2.11.6 Los espinores y la teoría del espín en forma matricial	314
2.11.7 Espín y rotaciones	316
2.11.8 Las matrices de Pauli.....	317
2.11.9 Operadores de momento magnético y momento angular intrínseco	318
2.11.10 Suma de momentos angulares	320
2.12. Átomos con varios electrones, el principio de exclusión y la tabla periódica	322
2.12.1 Descripción de un átomo con varios electrones.....	322
2.12.2 El método del campo autoconsistente o de Hartree	325
2.12.4 Propiedades de los elementos.....	333
2.12.5 El Principio de Exclusión.....	337
2.12.6 El Principio de Exclusión y la estructura atómica.....	338
2.12.7 La unión química y otras interacciones entre átomos	342
2.12.8 Interacción del átomo con campos externos	353
2.13. Partículas idénticas	356
2.13.1 La indistinguibilidad y la función de onda de un sistema de varias partículas idénticas	356
2.13.2 Funciones de onda simétricas y antisimétricas	359
2.13.3 Bosones y Fermiones	359
2.13.4 Sistemas de partículas independientes.....	360
2.13.5 El principio de exclusión de Pauli.....	361
2.13.6 Las interacciones de intercambio.....	362
2.13.7 El átomo de helio	364
2.14. Las estadísticas cuánticas.....	369
2.14.1 El límite clásico.....	369
2.14.2 La función de partición de un sistema de partículas idénticas sin interacción	370
2.14.3 Las distribuciones de Bose-Einstein y de Fermi-Dirac	371
2.14.4 El gas perfecto de Bosones.....	372
2.14.5 El gas de fotones y la radiación de cuerpo negro.....	380
2.14.6 La emisión y absorción de fotones	384
2.14.7 El gas perfecto de Fermiones	394
2.15 Mecánica Cuántica Relativista	400
2.15.1 Introducción	400
2.15.2 Fundamentos	401
2.15.3 Partículas de espín cero. Ecuación de Klein-Gordon	401
2.15.4 Partículas de espín $\frac{1}{2}$. Ecuación de Dirac.....	402
2.15.5 Teoría de huecos. Mar de Dirac	403
2.16 Algunas preguntas y recomendaciones.....	405
2.16.1 Algunas preguntas.....	405
2.16.2 Algunas recomendaciones.....	413
TEMA 3: DETECCIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE.	415
3.1. Introducción.	417
3.2. Fundamentos básicos.	420
3.2.1. Sensibilidad.....	420
3.2.2. Respuesta del detector	420
3.2.3. Resolución en energía. Factor de Fano	421
3.2.4. Función respuesta de un detector	422
3.2.5. Tiempo de respuesta de un detector	423

3.2.6. Eficiencia de un detector.....	423
3.2.7. Tiempo muerto.....	424
3.3. Detectores de ionización en gases.	426
3.3.1. Cámaras de ionización.....	426
3.3.2. Contador proporcional.....	429
3.3.3. Contador Geiger-Müller	430
3.4. Centelladores.....	435
3.4.1. Centelladores orgánicos.....	436
3.4.2. Centelladores inorgánicos.	437
3.5. Detectores de semiconductor.....	441
3.6. Espectroscopia.....	444
3.7 Detectores de película fotográfica	449
3.8 Detectores de termoluminiscencia	450
3.9 Algunas preguntas y recomendaciones.....	451
3.9.1. Algunas preguntas.....	451
3.9.2. Algunas recomendaciones.....	455

RADIOFISICA HOSPITALARIA

TOMO 2

TEMA 4: FÍSICA NUCLEAR.....	1
4.1. Conceptos previos.	3
4.1.1. Cronología de la física nuclear y de partículas.....	4
4.1.2. Constituyentes de la materia.....	7
4.1.3. Terminología	8
4.1.4. Unidades y dimensiones.....	10
4.1.5. Concepto de sección eficaz.....	11
4.2. Propiedades nucleares.	12
4.2.1. Masas nucleares	12
4.2.2. Energía de Separación de un Protón o de un Neutrón.	19
4.2.3. El Modelo de la Gota Líquida.	19
4.2.4. Abundancias de Especies en el Sistema Solar.	24
4.2.5. Espín Nuclear y Paridad.....	25
4.3. Tamaños y Formas Nucleares.....	26
4.3.1. Distribución de la Carga Eléctrica Nuclear.....	27
4.3.2. Rayos X Convencionales. Desplazamiento Isotópico.....	32
4.3.3. Espectroscopia de Rayos X en Átomos Muónicos.	36
4.3.4. Análisis de Núcleos Espejo.....	38
4.3.5. Resumen.....	40
4.4. Distribución de la Masa Nuclear.	41
4.5. La fuerza nuclear.	44
4.5.1. Propiedades de la Fuerza nucleón-nucleón.....	44
4.5.2 El deuterón	45
4.5.3 Dispersión nucleón-nucleón.....	50
4.5.4. Dispersión de neutrones lentos por H ₂	56
4.5.5. Propiedades de la fuerza nuclear.	56
4.5.6. Modelo de fuerzas de intercambio.....	58
4.6. Modelos nucleares.	61
4.6.1. Modelo de capas.	62
4.6.2. Modelos colectivos.....	69
4.6.3. Modelo unificado.....	74
4.7. Fisión Nuclear.	78
4.7.1. ¿Por qué se produce la fisión nuclear?	78
4.7.2. Características de la fisión.....	80
4.7.3. Consideraciones energéticas	81
4.7.4. Reacciones controladas de fisión.....	83
4.7.5. Reactores de fisión.....	85
4.8. Fusión Nuclear.	87
4.8.1. Introducción	87
4.8.2. Procesos de fusión básicos.....	89
4.8.3. Características de la fusión.....	89
4.8.4. Fusión solar.....	91
4.8.5. Reactores de fusión controlada.....	93
4.9 Algunas preguntas y recomendaciones.....	95
4.9.1 Algunas preguntas.....	95
4.9.2 Algunas recomendaciones.....	104
TEMA 5: TERMODINÁMICA Y FÍSICA ESTADÍSTICA	105
5.1. Introducción	107
5.2. Definiciones y Conceptos Básicos	109
5.3. La Temperatura.....	112

5.3.1 Fundamentos experimentales de las mediciones de temperatura	112
5.3.2 El termómetro de gas ideal.....	114
5.3.3 Escala de temperatura práctica internacional.....	116
5.3.4. Observaciones	116
5.4. La Primera Ley	117
5.4.1 Experimentos de Joule	118
5.4.2 Definición de energía interna.....	119
5.4.3 Definición de calor.....	120
5.4.4. La Primera Ley	120
5.4.5 Imposibilidad del móvil perpetuo de primera especie	122
5.4.6 Comentarios sobre el calor	122
5.4.7 Capacidades caloríficas.....	123
5.5. La Segunda Ley	124
5.5.1 Enunciación de la Segunda Ley	124
5.5.2 Diagrama simbólico de un ciclo	125
5.5.3 Corolarios de la Segunda Ley	126
5.5.4 La desigualdad de Clausius	133
5.5.5 La entropía	136
5.5.6 Ejemplos de ciclos reversibles.....	138
5.6 Entropía.....	141
5.6.1 Ecuación diferencial de la entropía	141
5.6.2 Aditividad de la entropía para sistemas compuestos	142
5.6.3 Determinación experimental de la entropía	142
5.6.4 Otras propiedades de la entropía	144
5.6.5 Variaciones de entropía en procesos irreversibles.....	147
5.6.6 Variaciones de entropía de un sistema aislado	147
5.6.7 Criterio entrópico para el equilibrio	148
5.6.8 Ejemplos de variaciones de entropía en procesos irreversibles.....	148
5.7. Métodos analíticos y aplicaciones	152
5.7.1 Expresión combinada de la Primera y Segunda Ley	152
5.7.2 Definición de nuevas funciones de estado.....	152
5.7.3 Aplicaciones de las relaciones de Maxwell.....	159
5.8. Condiciones de equilibrio y otros desarrollos analíticos	174
5.8.1 El principio del incremento de la entropía para un sistema aislado.....	174
5.8.2 El potencial químico y el equilibrio respecto del intercambio de materia	178
5.8.3 Las relaciones termodinámicas para sistemas abiertos.....	179
5.8.4 La ecuación fundamental y las ecuaciones de estado de un sistema	180
5.8.5 Las relaciones de Euler.....	181
5.8.6 La relación de Gibbs-Duhem	182
5.8.7 Tercera Ley de la Termodinámica.....	184
5.8.8 El principio entrópico para un sistema que interactúa con el ambiente.....	186
5.8.9 Trabajo máximo	190
5.9. Estabilidad del equilibrio termodinámico	192
5.9.1 Estabilidad intrínseca de un sistema simple.....	192
5.9.2 Criterios de estabilidad y el principio de Le Chatelier.....	194
5.9.3 Estabilidad mutua de sistemas de un solo componente	196
5.10. Gases y fluidos reales	198
5.10.1 La ecuación de estado de un gas real.....	198
5.10.2 La ecuación de van der Waals.....	199
5.10.3 La ecuación de estado virial	202
5.10.4 Las capacidades caloríficas de un gas real	203

5.10.5 El coeficiente de Joule-Thomson.....	204
5.10.6 El potencial químico de un fluido puro.....	206
5.11. Cambios de fase	208
5.11.1 Transiciones de fase de primer orden en sistemas de un componente.....	208
5.11.2 La regla de la palanca.....	214
5.11.3 El calor latente de transición	215
5.11.4 Estados metaestables en una transición de fase	216
5.11.5 Coexistencia de fases.....	218
5.11.6 Equilibrio de fases en sistemas de un solo componente	219
5.11.7 Aplicaciones de la ecuación de Clausius-Clapeyron.....	224
5.11.8 El punto crítico	226
5.11.9 Efecto de la presión externa sobre la presión de vapor.....	228
5.11.10 La regla de las fases de Gibbs para sistemas de muchos componentes.....	229
5.11.11 Transiciones de fase de orden superior.....	231
5.12. Termodinámica de soluciones	234
5.12.1 La ley de Gibbs-Dalton	234
5.12.2 La ley de Raoult	236
5.12.3 Elevación del punto de ebullición de una solución.....	238
5.12.4 Descenso crioscópico de una solución.....	241
5.12.5 Presión osmótica	244
5.13. Termodinámica química.....	247
5.13.1 Estequiometría de las reacciones químicas.....	247
5.13.2 Equilibrio químico	248
5.13.3 Grado de una reacción	249
5.13.4 Reacciones simultáneas.....	250
5.13.5 Calor de reacción	251
5.13.6 La estabilidad y el Principio de Le Chatelier en presencia de reacciones químicas	251
5.13.7 La regla de las fases para sistemas químicos.....	253
5.13.8 La ley de acción de las masas para reacciones químicas en gases ideales	253
5.13.9 Dependencia de la constante de equilibrio con la temperatura.....	254
5.13.10 Calor de reacción de las reacciones entre gases ideales	255
5.13.11 Aditividad de las reacciones	256
5.14. La Tercera Ley	257
5.14.1 Comentarios previos y trasfondo histórico.....	257
5.14.2 Enunciado de la Tercera Ley	257
5.14.3 El principio de Thomsen y Berthelot y la evidencia experimental de la Tercera Ley	258
5.14.4 Calores específicos y otras propiedades a baja temperatura.....	259
5.14.5 Constantes de equilibrio y funciones termodinámicas	261
5.14.6 Inalcanzabilidad del cero absoluto.....	262
5.15. Termodinámica de las superficies y de la radiación.....	264
5.15.1 Comentarios previos	264
5.15.2 Efectos de superficie	264
5.15.3 Radiación.....	269
5.16. Nociones de mecánica estadística	279
5.16.1 Comentarios previos	279
5.16.2 El peso estadístico de un macroestado	281
5.16.3 Equilibrio de un sistema aislado.....	283
5.16.4 Definición de la entropía de un sistema aislado	284
5.16.5 El equilibrio de un sistema en un baño calorífico y la distribución de Boltzmann.....	286
5.16.6 Definición general de la entropía	293
5.16.7 La Segunda Ley para los cambios infinitesimales	295

5.16.8 La Tercera Ley	303
5.17. El gas ideal clásico	305
5.17.1 Comentarios previos	305
5.17.2 La estadística de Maxwell-Boltzmann del gas perfecto clásico	307
5.17.3 Factorización de la función de partición de una molécula	309
5.17.4 La función de partición traslacional.....	310
5.17.5 Criterio de validez para el régimen clásico.....	311
5.17.6 La función de partición del gas perfecto clásico	313
5.17.7 Ecuación de estado, energía interna, capacidad calorífica y potencial químico del gas perfecto.....	314
5.17.8 La entropía	316
5.17.9 La entropía de una mezcla de gases perfectos.....	317
5.17.10 La distribución de velocidades de Maxwell	320
5.17.11 Distribución de energía de un gas perfecto en un baño térmico	325
5.18. La estadística clásica y la equipartición de la energía	328
5.18.1 Consideraciones generales	328
5.18.2 Generalidad de la distribución de Maxwell de la velocidad.....	329
5.18.3 La equipartición de la energía.....	330
5.18.4 La equipartición y el problema de los calores específicos	332
5.18.5 La capacidad calorífica molar de sólidos cristalinos	333
5.18.6 La capacidad calorífica molar de los gases	334
5.18.7 El fracaso de la equipartición y la teoría cuántica.....	334
5.18.8 La teoría de Planck de la radiación de cuerpo negro	336
5.18.9 Las teorías de Einstein y Debye del calor específico de los sólidos.....	343
5.18.9.1 El modelo de Einstein.....	344
5.18.9.2 La teoría de Debye	345
5.19. Teoría cinética elemental y propiedades de transporte	349
5.19.1 Fenómenos de transporte	349
5.19.2 El equilibrio termodinámico local	349
5.19.3 La noción de camino libre medio	349
5.19.4 El camino libre medio y la sección eficaz de colisiones	350
5.19.5 Difusión.....	351
5.19.6 Conducción del calor.....	353
5.19.7 Viscosidad	354
5.19.8 Cálculo de los coeficientes de transporte de un gas	357
5.19.9 Comparación con los valores experimentales de los coeficientes de transporte.....	362
5.20 Exergía	364
5.20.1. Introducción	364
5.20.2. El concepto de exergía.....	364
5.20.3. Eficiencia exergética y energética	365
5.21. Resúmenes y esquemas.....	366
5.22. Algunas preguntas y recomendaciones.....	375
5.22.1. Algunas preguntas.....	376
5.22.2. Algunas recomendaciones.....	382
TEMA 6: PARTÍCULAS FUNDAMENTALES, GRAVITACIÓN Y COSMOLOGÍA.....	383
6.1 Introducción Histórica a las partículas Elementales.....	385
6.1.1. El paradigma de la Física antigua	385
6.1.2. El paradigma de la Física clásica	387
6.1.3. El paradigma de la Física moderna.....	388
6.1.4 El paradigma de la Física actual	390

6.2. Decaimiento y colisiones de partículas.....	393
6.2.1. Interacciones	393
6.2.2. Decaimiento	394
6.2.3. Secciones eficaces.....	398
6.3. Propiedades de las partículas elementales.....	400
6.3.1. Introducción	400
6.3.2. Leptones	401
6.3.3. Hadrones.....	403
6.3.4. Partículas estables y resonancias.....	406
6.3.5. Conservación de números cuánticos	407
6.4. Interacciones en una teoría cuántica de campos.....	410
6.4.1. Interacción fuerte	411
6.4.2. Interacción electromagnética.....	412
6.4.3. Interacción débil.....	413
6.5. Simetrías discretas	417
6.5.1. Simetrías discretas en mecánica clásica	418
6.5.2. Simetrías discretas en mecánica cuántica no relativista.....	418
6.5.3. Simetrías discretas en teoría cuántica de campos	420
6.5.4. Paridad y conjugación de carga de sistemas de partículas.....	422
6.5.5. Conservación y violación de las simetrías discretas.....	424
6.6. Teoría de Grupos	429
6.6.1. Introducción	429
6.6.2. Propiedades generales	430
6.6.3. Representación de grupos	431
6.6.4. Representación Producto.....	434
6.6.5. Operadores tensoriales.....	435
6.6.6. Ejemplos de grupos discretos	436
6.7. Modelo de Quarks	441
6.7.1. Los quarks como representación fundamental de SU(3) de sabor	441
6.7.2. Interacciones entre quarks.....	447
6.7.3. Quarks pesados.....	449
6.7.4. Evidencias experimentales de los quarks.....	451
6.8. Esquema-Resumen	453
6.9 Teoría de Newton de la Gravitación Universal.....	461
6.9.1 Fuerza Gravitatoria, Campo Gravitatorio y Potencial Gravitatorio.....	461
6.9.2 Masa inercial y masa gravitatoria. Aceleración en un campo gravitatorio.....	461
6.9.3 Éxitos de la teoría de Newton. Descubrimiento de Neptuno.....	462
6.9.4 Problemas conceptuales: Igualdad de las masas inercial y gravitatoria. Interacción a distancia.	462
6.10 Teoría de Einstein de la Relatividad General	463
6.10.1 Principio de equivalencia.	463
6.10.2 Movimiento en un sistema inercial. Intervalo. Tensor métrico.	463
6.10.3 Movimiento en un sistema no inercial. Tensor métrico. Geodésicas	464
6.10.4 Ecuaciones de la relatividad general. Solución de Schwarzschild. Relación con la gravitación de Newton.....	465
6.10.5 Interpretación del movimiento en la teoría de Newton y la de Einstein.....	465
6.10.6 Pruebas experimentales de la relatividad general. Curvatura de la luz.....	466
6.10.7 Agujeros negros.	466
6.11 Cosmología	468
6.11.1 Cómo es el universo. Expansión del universo. Constante de Hubble.	468
6.11.2 Origen del universo. El Big Bang. Radiación de fondo del universo.....	468

6.11.3 Geometría del Universo. Densidad crítica. Materia oscura. Futuro del universo.	470
6.12 Agujeros negros	471
6.12.1. Clasificación teórica.....	471
6.12.2. Zonas observables.....	471
6.12.3 La entropía en los agujeros negros.....	472
6.13. Horizonte de sucesos.....	472
6.14. Radiación de Hawking.....	472
6.14.1. Origen de la radiación.....	473
6.14.2. Proceso de emisión	473
6.15. Radio de Schwarzschild.....	474
6.16. Singularidad	474
6.16.1. Tipos de singularidades.....	474
6.17. Ergosfera	476
6.17.1. El modelo de Schwarzschild	476
6.17.2. El modelo de Kerr.....	476
6.17.3. La ergoesfera y los viajes en el tiempo	476
6.18 Agujero negro de Schwarzschild.....	478
6.19. Agujero negro de Kerr	479
6.20. Agujero negro de Reissner-Nordstrøm	480
6.21. Agujero negro de Kerr-Newman.....	481
6.22. Agujero negro supermasivo.....	483
6.23. Agujero blanco	484
6.24. Agujero de gusano.....	485
6.25. Algunas preguntas y recomendaciones.....	486
6.25.1. Algunas preguntas.....	486
6.25.2 Algunas recomendaciones.....	492

RADIOFISICA HOSPITALARIA

TOMO 3

TEMA 7: ELECTROMAGNETISMO.....	1
7.1. Electrostática.....	3
7.1.1. Introducción	3
7.1.2. Campo eléctrico de una distribución de cargas	4
7.1.3. Potencial eléctrico	13
7.1.4. Conductores en un campo electrostático.....	16
7.1.5. Condensadores.....	19
7.1.6. Energía Electrostática	22
7.1.7. Dieléctricos.....	24
7.2. Circuitos de Corriente Continua	28
7.2.1. Introducción	28
7.2.2. Vector densidad de corriente	28
7.2.3. Conductividad, Ley de Ohm.....	30
7.2.4. Fuerza electromotriz.....	33
7.2.5. Reglas de Kirchhoff	36
7.2.6. Aplicación a circuitos de corriente continua.....	38
7.3. Magnetostática	42
7.3.1. Introducción	42
7.3.2. Fuerza de Lorentz	42
7.3.3. Fuerzas magnéticas sobre conductores	46
7.3.4. Ley de Biot-Savart.....	49
7.3.5. Ley de Ampère.....	50
7.4. Inducción electromagnética	52
7.4.1. Introducción.	54
7.4.2. Ley de Faraday	55
7.4.3. Inductancia	59
7.4.4. Energía magnética	63
7.5. Ecuaciones de Maxwell.....	65
7.5.1. Introducción	65
7.5.2. Antecedentes	65
7.5.3. Aportaciones de Maxwell.....	66
7.6. Circuitos de Corriente Alterna.....	70
7.6.1. Introducción	70
7.6.2. Relación $I \neq V$ para Resistencia, Condensador y Bobina.....	71
7.6.3. Generador de fem alterna.....	72
7.6.4. Valores eficaces	73
7.6.5. Análisis fasorial de circuitos de CA	74
7.6.6. Balance de potencia	80
7.7. Nociones generales de Ondas	84
7.7.1. Introducción	84
7.7.2. Ecuación de ondas	85
7.7.3. Ondas armónicas.	87
7.7.4. Energía e Intensidad de la onda	88
7.7.5. Interferencia de Ondas.....	90
7.7.6. Ondas estacionarias.....	95
7.7.7. Difracción	97
7.7.8. Grupo de Ondas.....	100
7.8. Ondas Electromagnéticas	105
7.8.1. Introducción	105
7.8.2. Ecuación de Ondas	106
7.8.3. Ondas planas armónicas.....	109

7.8.4. Intensidad de la onda electromagnética.....	110
7.8.5. Espectro electromagnético.....	112
7.8.6. Fuentes de las Ondas Electromagnéticas	113
7.9. Análisis vectorial.....	115
7.9.1. Vectores.....	115
7.9.2. Integral de flujo.....	121
7.10. Funciones armónicas y Análisis fasorial	122
7.10.1. Funciones Armónicas.....	122
7.10.2. Análisis fasorial.....	122
7.11. Esquemas	125
7.11.1. Electromagnetismo	125
7.11.2. Electrostática.....	127
7.11.3. Corriente continua	130
7.11.4. Corriente alterna	132
7.12 Algunas preguntas y recomendaciones.....	135
7.12.1 Algunas preguntas.....	135
7.12.2 Algunas recomendaciones.....	143
TEMA 8: ELECTRÓNICA DIGITAL Y ANALÓGICA.	147
8.1. Electrónica digital.	147
8.1.1. Introducción al álgebra de Boole.....	147
8.1.2. Operaciones lógicas básicas.	147
8.1.3. Propiedades del álgebra de Boole.	148
8.1.4. Otras operaciones lógicas.	149
8.1.5. Puertas lógicas.....	150
8.1.6. Funciones lógicas.	150
8.1.7. Simplificación de funciones.....	151
8.1.8. Tabla de verdad.	151
8.1.9. Familias lógicas.	152
8.1.10. Parámetros de puerta.	153
8.2. Corriente alterna.	156
8.2.1. Generador de corriente alterna.....	156
8.2.2. Efecto de los elementos de un circuito sobre el paso de la corriente alterna.....	156
8.2.3. Potencia media disipada en un elemento de circuito.....	157
8.2.4. Condición de resonancia $X_L=X_C$	157
8.2.5. Transformador.	157
8.2.6. Asociación de impedancias.	157
8.3. El diodo.	158
8.3.1. Introducción.	158
8.3.2. El diodo sin polarización.	158
8.3.3. Capa de agotamiento.....	158
8.3.4. Potencial de barrera.....	159
8.3.5. Polarización directa.	159
8.3.6. Polarización inversa	159
8.3.7. Tipos de diodos.....	160
8.3.8. Rango de voltaje y corriente.....	160
8.3.9. Clases de Diodos.....	161
8.3.10. Dispositivos Optoelectronicos.	163
8.4. Cuadripolos.	172
8.4.1. Introduccion.	172
8.4.2. Caracterización de un cuadripolo.	173

8.4.3. Utilización práctica de cudripolos.....	176
8.5. Transistores.....	178
8.5.1. Introducción.	178
8.5.2. BJT o Bipolar.....	180
8.5.3. Transistores efecto campo.	194
8.5.4 Otros transistores.....	202
8.6. Amplificador operacional.....	206
8.6.1. Introducción.	206
8.6.2. El amplificador operacional ideal.....	207
8.6.3. Configuraciones básicas del amplificador operacional.....	208
8.6.4. Configuraciones basadas en los circuitos inversor y no inversor.....	211
8.7. Filtros.....	217
8.7.1. Filtro digital.	217
8.7.2. Aproximación al diseño de filtros analógicos.....	217
8.7.3. Transformaciones en Frecuencia.....	221
8.7.4. Diseño de filtros digitales IIR.....	223
8.7.5. Método de la respuesta impulsional invariante.....	223
8.7.6. Método basado en la solución numérica de la Ecuación Diferencial.....	225
8.7.7. Método de la transformación bilineal.....	226
8.7.8. Diseño de filtros digitales FIR.....	228
8.8. Algunas preguntas y recomendaciones.....	236
8.8.1. Algunas preguntas.....	236
8.8.2 Algunas recomendaciones.....	239
TEMA 9: SEMICONDUCTORES.....	243
9.1. Teoría bandas. Conductores y aislantes.	243
9.2. Semiconductores. Electrones y huecos.	245
9.2.1 Semiconductores intrínsecos.....	245
9.2.2 Semiconductores extrínsecos, Tipos N y P.....	247
9.3. Distribución energética de los electrones.	249
9.4. Densidad de estados en las bandas.	250
9.5. Probabilidad de ocupación.....	251
9.5.1 Discusión de la función de Fermi.....	251
9.6. Localización del nivel de fermi.....	253
9.7. La unión n-p.	256
9.7.1 Unión en equilibrio.....	256
9.7.2 Unión fuera del equilibrio (polarizada).....	259
9.8. El diodo de unión.....	262
9.8.1 Limitaciones de los diodos reales.....	263
9.8.2 Tipos de diodos.	264
9.9. El transistor de unión.	267
9.9.1 Polarización del transistor.....	267
9.10. El transistor de efecto de campo (FET).....	269
9.10.1 El transistor JFET.	269
9.10.2 El transistor MOSFET de empobrecimiento.....	270
9.10.3 El transistor MOSFET de enriquecimiento.....	271
9.11. Algunas preguntas y recomendaciones.....	273
9.11.1. Algunas preguntas.....	273
9.11.2. Algunas recomendaciones.....	277
TEMA 10: FÍSICA DEL ESTADO-SÓLIDO Y MOLECULAR.....	281

10.1. Materia Condensada	281
10.1.1. Estados de Agregación de la Materia	281
10.1.2. Gas.....	282
10.1.3. Monocristal	284
10.1.4. Estructuras reticulares.....	286
10.1.5. Observación de las estructuras cristalinas	288
10.2. Electrones libres en metales.....	290
10.2.1. Fenomenología	290
10.2.2. Modelo clásico del electrón libre (Modelo de Drude-Lorentz).....	293
10.2.3. Modelo cuántico del electrón libre (Modelo de Sommerfeld).....	296
10.3. Electrones en una red periódica	302
10.3.1. Modelo cuántico del electrón ligado.....	302
10.3.2. Aislantes, Semiconductores y Conductores.....	308
10.3.3. Masa efectiva	311
10.3.4. Huecos	315
10.4. Difracción en cristales. Formulación de Bragg.....	318
10.5. Fonones. Vibraciones de los cristales.....	321
10.5.1. Propiedades Térmicas:	324
10.6. Magnetismo en la materia.	329
10.7. Superconductividad.	332
10.7.1. Efecto Josephson	333
10.8. Resumen-Esquemas.....	334
10.8.1 Estructura cristalina.....	334
10.8.2. Difracción en cristales	336
10.8.3 Cohesión en sólidos.....	336
10.8.4. Fonones: vibraciones de los cristales	338
10.8.5 Gas de electrones libres.....	340
10.8.6. Metales.....	340
10.8.7. Dieléctricos:.....	341
10.8.8. Propiedades magnéticas de los materiales.....	342
10.8.9. Superconductividad	345
10.9. Moléculas	348
10.9.1. Enlaces moleculares.....	348
10.10. Espectros moleculares.....	351
10.11. Espectros moleculares combinados	354
10.12. Efecto Ramman	357
10.13. Fosforescencia y fluorescencia.....	358
10.14. Resumen-Esquema	359
10.15. Algunas preguntas y recomendaciones.....	365
10.15.1. Algunas preguntas.....	365
10.15.2 Algunas recomendaciones.....	370
TEMA 11: INFORMÁTICA Y REDES.....	3753
11.1. Sistemas numéricos.	375
11.1.1. Bases numéricas.	375
11.1.2. Conversiones de un Sistema a Otro.	380
11.1.3. Operaciones Aritméticas en Binario.....	383
11.1.4. Representación de Números Enteros y de Punto Flotante.....	387
11.2. Arquitectura de los computadores.....	391
11.2.1. Microprocesador.....	391
11.2.2. Unidad de Control (UC).	394

11.2.3. Memoria RAM y ROM.....	395
11.2.4. Memoria CACHE.....	398
11.3. Distintas estructuras en sistemas operativos.....	400
11.3.1. Sistemas monolíticos.....	400
11.3.2. Sistemas nivelados.....	400
11.3.3. Máquinas virtuales.....	400
11.3.4. Modelo cliente-servidor.....	401
11.4. Categorías de Sistemas Operativos.....	403
11.4.1. Multitarea.....	403
11.4.2. Multiusuario.....	403
11.4.3. Multiproceso.....	403
11.5. Lista de los sistemas operativos más comunes.....	405
11.6. Redes de Petri.....	408
11.7. Planificación y gestión de procesos.....	410
11.7.1. Introducción a la planificación.....	410
11.7.2. Objetivos de la planificación.....	410
11.7.3. Algoritmos de planificación.....	410
11.8. Gestión de entrada/salida.....	414
11.8.1. Introducción.....	414
11.8.2. Software de E/S.....	415
11.9. Sistemas operativos distribuidos.....	417
11.9.1. Introducción.....	417
11.9.2. Sistema operativo distribuido vs sistema operativo centralizado.....	417
11.9.3. Hardware.....	418
11.9.4. Clasificación de Flynn.....	418
11.10. Modelo de referencia OSI (interconexión de sistemas abiertos).....	419
11.10.1. Modelo OSI.....	419
11.11. Protocolo TCP/IP.....	423
11.11.1. Introducción.....	423
11.11.2. Estructura Interna.....	423
11.11.3. Capas.....	424
11.11.4. Tabla de protocolos por niveles.....	451
11.12. Redes.....	453
11.12.1. ¿Qué es una red?.....	453
11.12.2. Clasificación de las redes según su extensión geográfica.....	453
11.12.3 Tipología de las redes de área local.....	454
11.12.4 Componentes de una red.....	459
11.13. Compiladores.....	463
11.13.1. Lenguajes de Programación.....	463
11.13.2. Traductores.....	463
11.13.3. Diseño de lenguajes.....	463
11.13.4. Estructura de un Compilador.....	464
11.13.5. Análisis Léxico.....	464
11.13.5. Análisis Sintáctico.....	465
11.13.6. Análisis Semántico.....	465
11.13.7. Generación de código Intermedio.....	465
11.13.8. Optimización de Código.....	465
11.13.9. Generación de Código.....	465
11.13.10. Administrador de la tabla de símbolos.....	465
11.13.11. Manejador de errores.....	465
11.14. Cifrado.....	466

11.14.1. Introducción	466
11.14.2. Mecanismos de cifrado	466
11.14.3. Métodos de Cifrado	466
11.14.4. Certificados Digitales	469
11.15 Algunas preguntas y recomendaciones.....	470
11.15.1 Algunas preguntas.....	470
11.15.2 Algunas recomendaciones.....	476

RADIOFISICA HOSPITALARIA

TOMO 4

TEMA 12: MECÁNICA Y ONDAS	3
12.1. Principios de la Mecánica	3
12.1.1. La Mecánica como Teoría Científica	3
12.1.2. Sistemas de Referencia; Espacio y Tiempo	3
12.1.3. Principio de la Relatividad de Galileo	4
12.1.4. Las Leyes de Newton	6
12.2. Dinámica de la Partícula	12
12.2.1. Principios y Teoremas Generales	12
12.2.2. Expresiones de Velocidad y Aceleración	16
12.2.3. Movimiento de una Partícula Libre	18
12.3. Oscilaciones Lineales con 1 Grado de Libertad	25
12.3.1. El Oscilador Armónico Simple	25
12.3.2. Oscilaciones en 2 Dimensiones	28
12.3.3. Oscilaciones con amortiguamiento	30
12.3.4. Oscilaciones Forzadas	33
12.3.5. El Espacio de las Fases	38
12.3.6. Métodos Numéricos para Integración Directa	40
12.4. Cinemática de Sistemas Rígidos	42
12.4.1. Velocidad y Aceleración en Sistemas Móviles	42
12.4.2. Campo de Velocidades del Sólido Rígido	43
12.4.3. Campo de Aceleraciones del Sólido Rígido	47
12.4.4. Composición de Movimientos	47
12.5. Fuerzas Centrales y órbitas Gravitatorias	48
12.5.1. Reducción del Sistema Binario	48
12.5.2. Movimiento bajo Fuerzas centrales	50
12.5.3. Órbitas Gravitatorias	52
12.5.4. Energía de las órbitas gravitatorias	56
12.5.5. Leyes de Kepler	59
12.6. Sistemas de Varias Partículas	60
12.6.1. Morfología de los Sistemas	60
12.6.2. Principios y Teoremas de la Dinámica de Newton-Euler	61
12.6.3. El Sistema del Centro de Masas	66
12.6.4. Trabajos Virtuales	69
12.6.5. Dinámica en Sistemas no Inerciales	72
12.6.6. Sistemas de masa variable	77
12.7. Dinámica Analítica	80
12.7.1. Coordenadas Generalizadas	80
12.7.2. Ecuaciones de Lagrange	82
12.7.3. Potencial dependiente de la velocidad	90
12.7.4. Sistemas con Ligaduras	90
12.7.5. Introducción al Cálculo de Variaciones	93
12.7.6. El Principio de Hamilton	96
12.7.7. La Dinámica a Partir del Principio de Hamilton	98
12.8. Dinámica del Sólido Rígido	103
12.8.1. Conceptos generales	103
12.8.2. Expresión de las magnitudes cinéticas	105
12.8.3. El tensor de inercia	108
12.8.4. Propiedades del Tensor de Inercia	111
12.8.5. Campo Tensorial de Inercia	116
12.8.6. Teorema de Euler	118
12.8.7. Ángulos de Euler	119

12.9. Ecuaciones de Hamilton	122
12.9.1. Introducción	122
12.9.2. La Transformada de Legendre y sus propiedades	122
12.9.3. Ecuaciones de Hamilton	123
12.9.4. Integrales Primeras.....	125
12.9.5. Generalización para fuerzas no conservativas	126
12.9.6. El principio de Hamilton aplicado a la función Hamiltoniana	126
12.9.7. Transformaciones Canónicas	128
12.10. Fluidos.....	129
12.10.1. Estática de Fluidos.....	129
12.10.2 Dinámica de Fluidos.....	151
12.10.3. Tensión superficial.....	179
12.11. Fenómenos de Transporte.....	193
12.11.1. Conducción del calor. Ley de Fourier.....	193
12.11.2. Medida de la conductividad térmica	195
12.11.3. Difusión unidimensional. Ley de Fick.....	196
12.11.4. Movimiento browniano. Sedimentación	198
12.12. Resúmenes y Esquemas	200
12.12.1. Ondas.....	200
12.12.2. Cinemática	201
12.12.3. Fluidos	202
12.12.4. Formulación de Hamilton	203
12.12.5. Formulación de Lagrange.....	208
12.12.6. Gravitación.....	211
12.13 Algunas preguntas y recomendaciones.....	213
12.13.1. Algunas preguntas.....	213
12.13.2. Algunas recomendaciones.....	219
TEMA 13: RELATIVIDAD.....	223
13.1. Conceptos básicos y relatividad de Galileo.....	223
13.1.1. Sistema de referencia.....	223
13.1.2. Principio de relatividad.....	223
13.1.3. Transformaciones de Galileo.....	224
13.1.4. Invariancia de las leyes de la física frente a las transformaciones de Galileo.....	224
13.2. Problemas de la transformación de Galileo.....	226
13.2.1. Experimento de Michelson-Morley.....	226
13.2.2. Ecuaciones de Maxwell.....	228
13.3. Relatividad Especial de Einstein.....	229
13.3.1. Transformaciones de Lorentz.....	229
13.3.2. Contracción del espacio.....	230
13.3.3. Dilatación del tiempo.....	231
13.3.4. Paradoja de los gemelos.....	231
13.3.5. Transformación de velocidades.....	231
13.4. Dinámica relativista.....	233
13.4.1. Expresión relativista del momento.....	233
13.4.2. Expresión relativista de la energía. Energía en reposo.....	234
13.5 Diferencia entre teoría general y especial	237
13.6 Algunas recomendaciones.....	238
TEMA 14: PROTECCIÓN RADIOLÓGICA Y APLICACIONES MÉDICAS.....	241
14.1. Radiaciones.....	241

14.1.1. Clasificación.....	241
14.2. Generación.....	244
14.2.1. Radiaciones ionizantes.....	244
14.2.2. Radiaciones no ionizantes.....	245
14.3. Cuantificación.....	246
14.3.1. Exposición.....	246
14.3.2. Dosis absorbida.....	246
14.3.3. Dosis equivalente.....	246
14.3.4. Dosis efectiva.....	247
14.4. Efectos biológicos.....	249
14.4.1. Deterministas.....	249
14.4.2. Probabilistas.....	249
14.5. Protección radiológica.....	250
14.5.1. Límite de dosis.....	250
14.5.2. Protección radiológica operacional.....	251
14.5.3. Irradiación y Contaminación.....	253
14.5.4. Legislación.....	253
14.6. Radiaciones no ionizantes.....	255
14.6.1. Zona óptica.....	256
14.6.2. LÁSER.....	259
14.6.3. Microondas y Radiofrecuencia.....	262
14.7. Radiodiagnóstico.....	266
14.8. Medicina nuclear y laboratorios.....	268
14.9. Radioterapia.....	270
14.10. Equipos de Rayos X.....	272
14.11. Ultrasonidos.....	278
14.12. Resonancia Magnética Nuclear.....	281
14.13. Algunas recomendaciones.....	287
TEMA 15: ÓPTICA.....	291
15.1. Óptica Geométrica.....	291
15.1.1. Óptica Geométrica Paraxial.....	291
15.1.2. Instrumentos de proyección.....	303
15.1.3. Telescopios.....	308
15.1.4. Microscopios.....	312
15.2. Óptica Electromagnética.....	314
15.2.1. Polarización.....	314
15.2.2. Propagación, reflexión y refracción.....	317
15.2.3. Óptica de medios conductores.....	325
15.2.4. Óptica de medios anisótropos.....	327
15.3. Interferencias.....	333
15.3.1. Coherencia.....	333
15.3.2. Interferencias de Young.....	337
15.3.3. Dispositivos interferométricos.....	340
15.4. Difracción.....	350
15.4.1. Teoría escalar.....	350
15.4.2. Aproximaciones de la Teoría Escalar.....	355
15.4.3. Estudio de casos particulares en aproximación de Fraunhofer.....	357
15.5. Resúmenes.....	363
15.6. Algunas preguntas y recomendaciones.....	366
15.6.1. Algunas preguntas.....	366

15.6.2 Algunas recomendaciones.....	369
TEMA 16: MATEMÁTICAS.....	373
16.1. Conceptos fundamentales del cálculo de probabilidades.	373
16.1.1 Conceptos Previos	373
16.1.2. Distintas definiciones de probabilidad.....	375
16.1.3. Teoremas fundamentales del cálculo de probabilidades.....	378
16.2. Variables aleatorias.....	380
16.2.1. Concepto de variable aleatoria.	380
16.2.2. Función de probabilidad: $f(x)$	380
16.2.3. Función de distribución de probabilidad: $F(x)$	381
16.2.4. Esperanza matemática. Momentos.	382
16.2.5. Medidas características de una variable aleatoria.	383
16.2.6. Función generatriz de momentos y función característica.	383
16.2.7. Función característica.....	383
16.3. Modelos univariantes de distribuciones de probabilidad.	385
16.3.1. Distribuciones discretas.	385
16.3.2. Distribuciones continuas de probabilidad.	387
16.3.3. Estudio particular de la distribución normal o de gauss.	388
16.4. Polinomio de interpolación.	390
16.5. Método de interpolación de Lagrange.....	403
16.6. Método de interpolación de Newton.....	392
16.7. Acotación del error de interpolación.	393
16.8. Cálculo vectorial	394
16.8.1. Introducción	394
16.8.2. Magnitudes escalares y vectoriales.	394
16.8.3. Operaciones con vectores (forma gráfica).....	394
16.8.4. Sistema de coordenadas ortogonales.....	398
16.8.5. Funciones vectoriales.	403
16.9. Matrices y determinantes	405
16.9.1. Introducción	405
16.9.2. Matrices	405
16.9.3. Clases de matrices.....	405
16.9.4. Operaciones con matrices.....	407
16.9.5. Matrices invertibles	409
16.9.6. Matrices y sistemas de ecuaciones lineales.....	411
16.9.7. Determinantes	412
16.9.8. Propiedades de los determinantes	414
16.9.9. Determinante de orden arbitrario	414
16.9.10. Adjunto de una matriz.....	415
16.9.11. Cálculo del rango de una matriz	416
16.9.12. Aplicaciones de los determinantes.....	418
16.9.13. Discusión de los sistemas de ecuaciones lineales.....	418
16.9.14. Polinomio característico.....	419
16.9.15. Valores propios y vectores propios.....	420
16.10. Calculo de límites	421
16.10.1. Límites laterales	421
16.10.2. Indeterminaciones	421
16.10.3. Sucesiones	421
16.10.4. Series.....	423
16.10.5. Funciones de variable real.....	426

16.10.6. Derivabilidad.....	427
16.10.7. Series de potencias.....	429
16.10.8. Representación gráfica de funciones.....	430
16.10.9. Integrales Inmediatas	432
16.11. Geometría.....	434
16.11.1. Cónicas como lugar geométrico	434
16.11.2. La circunferencia.....	434
16.11.3. La parábola	434
16.11.4. La elipse.....	436
16.11.5. La hipérbola.....	437
16.11.6. Tabla de cuádricas	438
16.11.7. Operaciones trigonométricas	439
16.12. Resúmenes.	441
16.13. Algunas preguntas y recomendaciones.....	455
16.13.1. Algunas preguntas.....	455
16.13.2. Algunas recomendaciones.....	459