

# ÍNDICE SISTEMÁTICO

	<u>PÁGINA</u>
Sumario .....	5
Prólogo .....	7
<b>Unidad didáctica 1. El campo electrostático (I)</b> .....	<b>9</b>
Objetivos de la unidad .....	12
1. Introducción .....	13
1.1. ¿Campo eléctrico o electrostático? .....	13
2. La carga: el origen de la interacción electrostática .....	13
2.1. Interacciones entre partículas .....	13
2.2. Carga eléctrica .....	14
2.2.1. ¿Qué es la carga eléctrica? .....	14
2.2.2. La carga eléctrica en el mundo macroscópico .....	15
2.2.3. El signo de la carga .....	16
2.3. Distribuciones de carga .....	17
2.3.1. Cargas puntuales (o distribuciones puntuales) .....	17

2.3.2. Distribuciones volumétricas de carga .....	18
2.3.3. Distribuciones de superficie y lineales .....	19
2.4. Conservación de la carga .....	21
3. La interacción electrostática .....	21
3.1. La ley de Coulomb .....	21
3.2. El campo electrostático .....	25
3.2.1. Otra forma de entender la ley de Coulomb .....	25
3.2.2. Un nuevo esquema mental .....	26
3.2.3. Propiedades básicas del campo electrostático .....	27
3.2.3.1. Es un campo vectorial .....	27
3.2.3.2. Las fuentes del campo son las cargas .....	27
3.2.3.3. El campo cumple el principio de superposición ..	28
3.2.3.4. El campo solo toma un valor en un punto .....	28
3.2.3.5. Es un campo conservativo .....	28
3.2.4. Dibujando el campo electrostático .....	29
3.2.4.1. Líneas de campo .....	30
3.2.4.2. Propiedades de las líneas de campo electrostático	31
4. Cálculo del campo electrostático en el vacío .....	32
4.1. Campo de una distribución de cargas discretas .....	33
4.2. Campo de una distribución de carga continua .....	35
5. El campo del dipolo eléctrico .....	38
5.1. ¿Qué podemos esperar del campo del dipolo? .....	38
5.2. Líneas de campo del dipolo .....	39
5.3. Momento dipolar .....	39
5.4. Cálculo del campo del dipolo a una gran distancia .....	40
5.4.1. Campo del dipolo a lo largo del eje $z$ .....	40
5.4.2. Campo del dipolo en el plano $xy$ .....	42
5.5. Importancia del dipolo eléctrico .....	44
5.5.1. Molécula de agua y otras moléculas polares .....	44
6. El flujo del campo electrostático y la ley de Gauss .....	45
6.1. Flujo de un campo vectorial .....	45
6.2. La ley de Gauss .....	47
6.2.1. En versión diferencial .....	47

6.2.2. En versión integral .....	48
6.2.3. Consecuencias de la ley de Gauss .....	49
6.2.4. Uso de la ley de Gauss para calcular el campo .....	50
6.2.4.1. Campo de una carga puntual en el origen .....	51
6.2.4.2. Esfera cargada uniformemente .....	53
6.2.4.3. Campo creado por un hilo infinito .....	57
6.2.5. Campo creado por una superficie cargada infinita .....	59
6.2.6. Otros ejemplos y contraejemplos de aplicabilidad de la ley de Gauss .....	62
6.2.6.1. Sí son simetrías esféricas .....	62
6.2.6.2. No son simetrías esféricas .....	63
6.2.6.3. Sí son simetrías cilíndricas .....	63
6.2.6.4. No son simetrías cilíndricas .....	64
7. Conductores en equilibrio electrostático .....	64
7.1. ¿Qué es un conductor? .....	65
7.1.1. Metales .....	65
7.1.2. Otros conductores .....	65
7.2. ¿Qué significa en equilibrio electrostático? .....	65
7.3. Campo en el interior del metal .....	66
7.4. Campo en la superficie del metal .....	68
7.4.1. Forma del campo .....	68
7.4.2. Valor del campo y de la densidad de carga superficial .....	69
7.4.3. Campo y curvatura del metal .....	71
8. Postulados fundamentales del campo electrostático .....	72
8.1. Teorema de Helmholtz .....	72
8.1.1. Enunciado del teorema .....	72
8.1.2. Fuentes escalares y fuentes vectoriales de un campo .....	73
8.1.3. Clasificación de los campos .....	74
8.1.3.1. Campos solenoidales .....	74
8.1.3.2. Campos irrotacionales o conservativos .....	74
8.1.3.3. Campos mixtos .....	75
8.2. El campo electrostático .....	75
Actividades de autocomprobación .....	76
Referencias bibliográficas .....	80

<b>Unidad didáctica 2. El campo electrostático (II): energía y potencial .....</b>	<b>81</b>
Objetivos de la unidad .....	84
1. Introducción .....	85
2. Energía electrostática de una carga puntual en un campo electrostático .....	85
2.1. Diferencia de energía potencial entre dos puntos .....	85
2.2. Energía potencial en un punto cualquiera .....	87
2.3. Independencia del camino elegido: el campo es conservativo .....	88
2.4. Otras consecuencias de la independencia del camino .....	89
3. El potencial electrostático .....	89
3.1. Primera visión: la consecuencia de los postulados .....	89
3.1.1. Demostración breve .....	90
3.1.2. Relación entre el campo y el potencial en términos matemáticos .....	91
3.2. Segunda visión: una interpretación física del potencial .....	92
3.3. Unidades del potencial .....	93
3.4. Valor absoluto del potencial y otros potenciales .....	94
3.5. Otras propiedades del potencial .....	95
4. Potencial, superficies equipotenciales y las líneas del campo .....	95
4.1. Gradiente de una función escalar .....	96
4.2. La altura del campo electrostático .....	97
4.2.1. Un pozo de potencial .....	98
4.3. Lugares equipotenciales .....	99
4.3.1. Definición de una «superficie equipotencial» .....	100
4.3.2. El campo y las superficies equipotenciales .....	100
4.3.3. Potencial y líneas de nivel .....	101
4.3.4. Trabajo y lugares equipotenciales .....	102
5. Potencial asociado a una distribución de cargas .....	103
5.1. Potencial electrostático generado por una carga puntual .....	103
5.2. Potencial generado por una distribución de cargas discretas .....	106
5.3. Potencial creado por una distribución de carga continua .....	106
5.3.1. Ejemplo: potencial creado por un anillo cargado a lo largo de su eje .....	108

6. Otra forma de calcular el campo electrostático .....	110
6.1. El campo calculado desde el potencial .....	110
6.1.1. Campo generado por un disco cargado .....	110
6.2. Unicidad de la solución .....	112
7. Ecuaciones de Poisson y Laplace: el problema electrostático .....	113
7.1. El operador laplaciano en cartesianas .....	114
7.2. Ecuación de Poisson .....	114
7.3. Ecuación de Laplace .....	115
7.4. El problema electrostático .....	115
7.5. Potencial electrostático entre dos placas conductoras .....	116
7.5.1. Resolución de la ecuación de Laplace .....	116
7.5.2. Condiciones en la frontera .....	117
7.5.3. Cálculo del campo eléctrico .....	118
8. Conductores y el potencial electrostático .....	118
8.1. Diferencia de potencial entre dos puntos en el conductor .....	118
8.2. El conductor es un volumen equipotencial .....	119
8.3. Poner a tierra un conductor .....	120
8.4. Potencial de una esfera conductora cargada .....	120
9. Energía de una distribución de carga .....	123
9.1. Energía de una distribución de tres cargas puntuales .....	123
9.2. Las distribuciones almacenan energía .....	125
9.3. Energía positiva y energía negativa .....	126
9.4. Energía de una distribución discreta de cargas .....	126
9.5. Energía de una distribución continua de carga .....	127
9.5.1. ¿Qué quiere decir esta expresión? .....	127
9.5.2. Energía de una esfera conductora cargada .....	129
10. La energía almacenada en el campo .....	130
10.1. Demostración previa .....	130
10.2. Implicación 1: el campo tiene energía .....	133
10.3. Implicación 2: el campo mide una densidad de energía .....	134
10.4. Implicación 3: el campo como entidad propia .....	134
Actividades de autocomprobación .....	136
Referencias bibliográficas .....	140

<b>Unidad didáctica 3. El campo electrostático (III): dieléctricos y condensadores .....</b>	<b>141</b>
Objetivos de la unidad .....	143
1. Introducción .....	144
2. Presentación de los condensadores eléctricos .....	144
2.1. Almacenando energía eléctrica .....	144
2.2. ¿Qué es un condensador eléctrico? .....	146
2.2.1. Presentación del condensador plano de placas paralelas .....	147
2.3. Estructuras habituales de condensadores .....	148
3. ¿Cómo funciona un condensador? La capacidad .....	149
3.1. Análisis del condensador de placas planas paralelas .....	149
3.2. La ecuación del condensador: capacidad .....	152
4. Usos y aplicaciones .....	153
4.1. Símbolo circuital del condensador .....	155
5. Determinación de la capacidad de un condensador .....	155
5.1. Condensador plano de placas paralelas .....	156
5.2. Condensador cilíndrico .....	158
5.3. Condensador esférico .....	160
6. Asociación de condensadores .....	161
6.1. Asociación de dos condensadores en paralelo .....	162
6.2. Asociación de varios condensadores en paralelo .....	163
6.3. Asociación de dos condensadores en serie .....	164
6.4. Asociación de varios condensadores en serie .....	166
7. Energía almacenada en un condensador .....	167
7.1. Cálculo de la energía mediante el análisis de la distribución de carga .....	167
7.2. Cálculo de la energía usando el proceso de carga del condensador ....	169
7.3. Cálculo de la energía en función de los campos internos .....	171
7.4. Fuerza entre las placas de un condensador plano .....	173
7.4.1. Cálculo de la fuerza haciendo uso de la ley de Coulomb .....	173
7.4.2. Cálculo de la fuerza haciendo uso de la energía almacenada .....	174
8. Dieléctricos .....	175
8.1. Experimento de Faraday con dieléctricos .....	176
8.2. ¿Qué es un dieléctrico? .....	178

8.3. Comportamiento de los dieléctricos ante un campo eléctrico .....	178
8.3.1. Dipolos moleculares .....	178
8.3.2. El dieléctrico sumergido en un campo eléctrico .....	179
8.4. Carga de polarización .....	180
8.5. Campo interno y campo total .....	181
8.5.1. Campo generado por una carga puntual en el interior de un dieléctrico .....	182
8.6. Constante dieléctrica y permitividad de un dieléctrico .....	183
8.7. Ruptura de un dieléctrico .....	184
9. Dieléctricos y condensadores .....	185
9.1. El experimento de Faraday (de nuevo) .....	185
9.2. Cálculo de la capacidad de un condensador con un dieléctrico .....	185
9.2.1. Capacidades de los condensadores habituales .....	186
9.3. Ventajas de los dieléctricos .....	187
Actividades de autoevaluación .....	188
Referencias bibliográficas .....	191
<b>Unidad didáctica 4. Circuitos de corriente continua .....</b>	<b>193</b>
Objetivos de la unidad .....	196
1. Introducción .....	197
2. Corriente eléctrica .....	197
2.1. Un experimento de (casi) electrostática .....	197
2.2. Definición de «corriente eléctrica» .....	199
2.3. Densidad de corriente .....	200
2.4. Relación entre la corriente y la densidad de corriente .....	202
2.5. La densidad de corriente superficial .....	203
3. Ley de Ohm .....	204
3.1. Movimiento de las cargas dentro de un conductor: conducción .....	204
3.2. Deducción de la ley de Ohm .....	206
3.3. Resistencia y resistividad de un conductor .....	208
3.3.1. Variación de la resistencia con la temperatura .....	210
3.4. Materiales lineales y materiales no lineales .....	210

4. Ley de Joule: potencia disipada en un conductor .....	211
4.1. La experiencia de Joule .....	211
4.2. El conductor se calienta .....	211
4.3. Deducción de la ley de Joule .....	212
5. Circuitos eléctricos y componentes de los circuitos .....	213
5.1. Componentes de los circuitos eléctricos .....	214
5.1.1. Fuentes de tensión .....	214
5.1.1.1. Relación tensión/corriente ( $I-V$ ) de una fuente de tensión .....	215
5.1.1.2. Potencia en una fuente de tensión .....	215
5.1.2. Fuentes de corriente .....	216
5.1.2.1. Relación tensión/corriente ( $I-V$ ) de una fuente de corriente .....	217
5.1.2.2. Potencia en una fuente de tensión .....	217
5.1.3. Cables o hilos conductores (o pistas eléctricas o conexiones)	218
5.1.3.1. Relación tensión/corriente ( $I-V$ ) de un hilo de un circuito .....	218
5.1.3.2. Potencia en un hilo de interconexión .....	218
5.1.4. Resistencias .....	219
5.1.4.1. Relación tensión/corriente ( $I-V$ ) de una resistencia	219
5.1.4.2. Potencia en una resistencia .....	220
5.1.5. Otros componentes .....	220
5.2. Circuito eléctrico de parámetros concentrados .....	222
6. Potencia en circuitos eléctricos en corriente continua .....	222
7. Asociación de resistencias .....	224
7.1. Asociación de dos resistencias en serie .....	224
7.2. Asociación de $N$ resistencias en serie .....	225
7.3. Asociación de dos resistencias en paralelo .....	226
7.3.1. Regla del producto partido por la suma .....	227
7.4. Asociación de $N$ resistencias en paralelo .....	227
7.4.1. $N$ resistencias iguales en paralelo .....	228
7.5. Comparación con la asociación de condensadores .....	228
7.6. Asociaciones complejas .....	228



8. Resolución de circuitos-leyes de Kirchhoff .....	229
8.1. Topología de un circuito: nudos, ramas y mallas .....	230
8.1.1. Nudo .....	230
8.1.2. Rama .....	231
8.1.3. Malla .....	231
8.2. Leyes de Kirchhoff .....	232
8.2.1. Primera ley de Kirchhoff: ley de los nudos o de las corrientes	233
8.2.2. Segunda ley de Kirchhoff: ley de las mallas o de las tensiones	234
8.3. Aplicación de las leyes de Kirchhoff para resolver un circuito .....	234
8.4. Método de las mallas .....	237
9. Equivalentes de un puerto: Thévenin y Norton .....	242
9.1. Teorema de Thévenin .....	243
9.2. Teorema de Norton .....	243
9.3. Cálculo del equivalente de Thévenin .....	244
9.3.1. Cálculo de la tensión de Thévenin .....	245
9.3.2. Cálculo de la resistencia de Thévenin .....	246
9.4. Cálculo del equivalente de Norton .....	248
10. Ecuaciones de Kennelly .....	248
10.1. Transformación triángulo ( $\pi$ ) a estrella (T) .....	249
10.2. Transformación estrella (T) a triángulo ( $\pi$ ) .....	249
Actividades de autocomprobación .....	250
Referencias bibliográficas .....	254
<b>Unidad didáctica 5. Circuitos en régimen transitorio .....</b>	<b>255</b>
Objetivos de la unidad .....	258
1. Introducción .....	259
2. ¿En qué regímenes puede funcionar un circuito? .....	259
2.1. Régimen permanente en continua .....	260
2.2. Régimen permanente sinusoidal .....	260
2.3. Régimen transitorio .....	261

3. Componentes de un circuito en régimen transitorio .....	262
3.1. Resistencias .....	263
3.1.1. Comportamiento dinámico de las resistencias .....	263
3.1.2. Ejemplos de variaciones temporales de tensión y corriente ..	263
3.2. Condensadores .....	264
3.2.1. Comportamiento dinámico de los condensadores .....	264
3.2.2. Ejemplos de variaciones temporales de tensión y corriente ..	267
3.3. Bobinas o inductancias .....	268
3.3.1. Comparación entre una bobina y un condensador .....	268
3.3.2. Comportamiento dinámico de las bobinas .....	269
3.3.3. Ejemplos de variaciones temporales de tensión y corriente ..	270
4. Análisis de regímenes transitorios .....	271
5. Análisis del transitorio en un circuito $R-C$ .....	272
5.1. Transitorio de encendido en un circuito $R-C$ .....	272
5.1.1. Presentación del circuito .....	272
5.1.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....	273
5.1.3. Resolución de la ecuación diferencial .....	274
5.1.4. Cálculo de la constante de integración .....	276
5.1.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....	276
5.1.6. Constante de tiempo .....	277
5.2. Transitorio de apagado en un circuito $R-C$ .....	278
5.2.1. Presentación del circuito .....	278
5.2.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....	278
5.2.3. Resolución de la ecuación diferencial .....	279
5.2.4. Cálculo de la constante de integración .....	280
5.2.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....	280
5.2.6. Constante de tiempo .....	281
6. Análisis del transitorio en un circuito $R-L$ .....	282
6.1. Transitorio de encendido en un circuito $R-L$ .....	282
6.1.1. Presentación del circuito .....	282
6.1.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....	282
6.1.3. Resolución de la ecuación diferencial .....	283
6.1.4. Cálculo de la constante de integración .....	285
6.1.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....	285
6.1.6. Constante de tiempo .....	286

6.2. Transitorio de apagado en un circuito <i>R-L</i> .....	287
6.2.1. Presentación del circuito .....	287
6.2.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....	288
6.2.3. Resolución de la ecuación diferencial .....	289
6.2.4. Cálculo de la constante de integración .....	289
6.2.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....	290
6.2.6. Constante de tiempo .....	291
7. Energía y potencia en los transitorios .....	291
7.1. Potencia en régimen dinámico .....	291
7.2. Energía almacenada y energía disipada: conservación de la energía ..	292
7.2.1. Transitorio de apagado <i>R-C</i> .....	292
7.2.2. Transitorio de apagado <i>R-L</i> .....	294
8. Importancia del análisis transitorio .....	295
Actividades de auto comprobación .....	297
Referencias bibliográficas .....	300
<b>Unidad didáctica 6. Circuitos en régimen permanente sinusoidal ..</b>	<b>301</b>
Objetivos de la unidad .....	304
1. Introducción .....	305
1.1. Facilidad de transformación de tensión. La distribución eléctrica .....	305
1.2. Otras ventajas de la corriente alterna .....	307
2. Circuitos en RPS .....	307
2.1. El concepto de «RPS» .....	307
2.2. Estructura de un circuito en RPS .....	308
3. Componentes de un circuito en RPS .....	308
3.1. Fuentes en un circuito en RPS .....	308
3.1.1. Parámetros clave de la señal sinusoidal .....	309
3.1.2. Simbología de las fuentes en circuitos de alterna .....	311
3.1.3. ¿Por qué usamos señales sinusoidales? .....	312
3.2. Resistencias en RPS .....	312
3.2.1. Condensadores en RPS .....	314
3.2.2. Bobinas en RPS .....	317

3.3. Cuadro-resumen del comportamiento de los componentes pasivos en RPS .....	319
4. Interludio: breve recordatorio de números complejos .....	320
4.1. El concepto de «número complejo» .....	320
4.2. Partes de un número complejo: el plano complejo .....	321
4.3. Representación de números complejos: módulo y argumento .....	322
4.3.1. Forma binómica .....	322
4.3.2. Módulo-argumento .....	322
4.3.3. Otras formas de representación .....	323
4.3.4. Cambio de forma módulo-argumental a binómica .....	323
4.3.5. Cambio de forma binómica a módulo-argumental .....	324
4.4. Operaciones con números complejos .....	325
4.4.1. Suma y resta .....	325
4.4.2. Multiplicación .....	325
4.4.3. División .....	326
4.4.4. El conjugado de un número complejo .....	326
4.4.5. Inverso y opuesto .....	328
5. Tensiones y corrientes en RPS como números complejos .....	328
5.1. Parámetros fundamentales de las señales sinusoidales (de nuevo) .....	328
5.2. Funciones sinusoidales y números complejos .....	329
5.2.1. Cambio de formato .....	330
5.3. Operaciones con funciones sinusoidales .....	331
5.3.1. Suma de dos corrientes .....	331
5.3.2. Desfase y multiplicación .....	333
6. Ley de Ohm generalizada: la impedancia eléctrica .....	333
6.1. Impedancia de un condensador .....	333
6.2. Impedancia de una bobina .....	334
6.3. Impedancia de una resistencia .....	335
6.4. ¿Qué es la impedancia? .....	336
6.5. Cuadro-resumen de impedancias .....	336
7. Asociación de impedancias .....	336
7.1. Caso 1: resistencia y condensador en serie .....	337
7.2. Caso 2: resistencia y bobina en serie .....	338
7.3. Caso 3: condensador y bobina en serie .....	339
7.4. Caso general .....	340

8. Términos de la impedancia .....	341
8.1. Parte real de la impedancia .....	341
8.2. Parte imaginaria de la impedancia .....	341
8.3. Admitancias .....	342
9. Resolución de circuitos en RPS .....	343
9.1. Equivalente matemático del análisis RPS al análisis en continua .....	343
9.2. Leyes de Kirchhoff .....	344
9.3. Método de las mallas generalizado .....	345
9.4. Equivalente de Thévenin .....	345
9.5. Principio de superposición: circuitos con fuentes de diferentes pulsaciones .....	346
10. Valor eficaz de una tensión y una corriente .....	348
10.1. El valor máximo .....	348
10.2. Medida de la potencia de la señal de tensión .....	349
10.3. Valor eficaz .....	351
10.4. Significado del valor eficaz (de nuevo) .....	352
10.5. Uso del valor eficaz .....	353
11. Potencia en RPS .....	353
11.1. Potencia en una impedancia .....	354
11.1.1. Potencia activa en la impedancia .....	356
11.1.2. Potencia reactiva en la impedancia .....	357
11.1.3. Relación con el desfase entre ambas señales .....	358
11.2. Potencia aparente .....	359
11.3. Términos de la potencia aparente .....	360
11.3.1. Potencia activa .....	361
11.3.2. Potencia reactiva .....	361
11.3.3. Potencia aparente .....	362
11.3.4. Importancia de la potencia aparente y el factor de potencia .	362
Actividades de autocomprobación .....	364
Referencias bibliográficas .....	369
<b>Unidad didáctica 7. El campo magnetostático .....</b>	<b>371</b>
Objetivos de la unidad .....	374

1. Introducción .....	375
1.1. Algunas aplicaciones del campo magnetostático .....	375
1.2. ¿Por qué estudiamos antes el campo electrostático que el magnetostático? .....	376
2. Primera aproximación al campo magnetostático .....	376
2.1. El camino que vamos a seguir .....	376
2.2. ¿Qué es el campo magnetostático y qué lo crea? .....	377
2.2.1. Fuentes del campo magnético .....	377
2.2.2. Un experimento mental: el campo magnético de un hilo de corriente .....	378
2.3. ¿Sobre qué actúa el campo magnético? .....	379
2.4. ¿Campo magnético o campo magnetostático? .....	379
3. Segunda aproximación al campo magnetostático .....	380
3.1. Presentación formal .....	380
3.2. Postulados fundamentales del campo .....	380
3.3. Características muy básicas del campo magnetostático .....	381
3.3.1. Cumple el principio de superposición .....	381
3.3.2. Es un campo solenoidal .....	382
3.3.3. Es un campo no conservativo .....	383
3.4. ¿Cómo es el campo magnético creado por una corriente o una carga? .....	383
3.5. Interacción del campo magnético: relación de Lorentz .....	383
4. Creando campo magnetostático .....	384
4.1. Campo creado por una carga puntual en movimiento .....	384
4.1.1. Características del campo creado por una carga puntual .....	387
4.1.2. Unidades del campo magnético (de nuevo) .....	388
4.2. Campo magnético generado por una corriente eléctrica. La ley de Biot y Savart .....	389
4.2.1. Corriente frente a carga en movimiento .....	389
4.2.2. Ley de Biot y Savart .....	389
4.2.3. Campo generado por algunas distribuciones de corriente .....	391
4.2.3.1. Campo creado por un segmento rectilíneo de corriente .....	391
4.2.3.2. Campo creado por un hilo infinito .....	393
4.2.3.3. Campo en el centro de una espira cuadrada .....	394

4.2.4. Campo en el eje de una espira circular .....	396
4.2.5. Regla de la mano derecha .....	398
5. Midiendo el efecto del campo magnetostático .....	399
5.1. El efecto del campo magnético sobre una carga .....	399
5.1.1. Recordatorio de la ley de Lorentz .....	399
5.1.2. Forma de la fuerza magnética sobre una carga .....	399
5.1.3. Características de la fuerza magnética .....	400
5.1.4. La fuerza magnética no varía la energía de las partículas cargadas .....	401
5.2. Efecto del campo magnético sobre una corriente eléctrica en un conductor .....	401
5.2.1. Corriente eléctrica en el interior de un conductor .....	401
5.2.2. Fuerza magnética sobre un diferencial de corriente .....	402
5.2.3. Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea constante ...	403
5.2.4. Fuerza magnética sobre una corriente filiforme cualquiera ..	404
5.3. Fuerza entre dos conductores paralelos .....	404
5.3.1. Deducción de la fuerza .....	404
5.3.2. Fuerza por unidad de longitud .....	405
5.3.3. Similitud con la fuerza de Coulomb .....	406
6. Acción del campo sobre espiras de corriente .....	406
6.1. Efecto sobre una espira rectangular .....	407
6.2. Fuerza neta del campo sobre una espira cualquiera .....	409
6.3. Par de fuerzas sobre una espira rectangular .....	409
6.4. Momento magnético de una espira .....	410
7. Ley circuital de Ampère .....	412
7.1. Enunciado de la ley .....	412
7.2. Origen de la ley .....	412
7.3. Aplicabilidad de la ley .....	413
7.4. La ley tiene dirección y sentido .....	415
7.5. La ley de Ampère nos permite calcular el campo .....	416
7.5.1. Una corriente rectilínea infinita .....	416
7.5.2. Un cilindro de corriente de longitud infinita .....	418
7.5.2.1. Campo en el exterior del cilindro .....	418
7.5.2.2. Campo en el interior del cilindro .....	419

7.5.3. Campo en el interior de un solenoide .....	421
7.5.3.1. Aproximación de solenoide infinito .....	421
7.5.3.2. Aplicación de la ley de Ampère .....	422
8. ¿Y los imanes? El campo magnético en la materia .....	424
8.1. Imanación .....	424
8.2. El campo $\vec{H}$ y la permeabilidad relativa .....	427
8.2.1. Tipos de materiales según su comportamiento magnético ...	427
9. Los polos .....	428
9.1. Polos de una espira .....	429
Actividades de autocomprobación .....	431
Referencias bibliográficas .....	435
<b>Unidad didáctica 8. Introducción a la electrodinámica clásica: inducción y ecuaciones de Maxwell .....</b>	<b>437</b>
Objetivos de la unidad .....	440
1. Introducción .....	441
2. Ley de Faraday: primera unificación de los campos .....	441
2.1. Experimentos de Faraday .....	441
2.1.1. Primer experimento de Faraday: solenoide de doble bobinado .....	442
2.1.2. Segundo experimento de Faraday: una espira y un imán .....	443
2.2. ¿Fuerza electromotriz o tensión eléctrica? .....	444
2.3. Enunciado de la ley de Faraday (o Faraday-Lenz) .....	444
2.3.1. Aplicabilidad .....	445
2.3.2. Flujo del campo magnético .....	446
2.3.3. Variación del flujo del campo magnético .....	447
2.3.4. Lo que mide el voltímetro: la tensión de circuito abierto .....	447
2.4. Ley de Faraday según Maxwell o la primera unión de los campos .....	448
2.4.1. Investigando el interior del conductor .....	448
2.4.2. Forma puntual de la ley de Faraday .....	449
2.4.3. Forma integral de la ley de Faraday .....	450
2.4.3.1. Cuando el circuito no cambia con el tiempo .....	450
2.4.3.2. Cuando el circuito sí cambia con el tiempo .....	452
2.4.4. Relatividad en el experimento de Faraday .....	452



3. Inductancia .....	453
3.1. Flujo del campo magnético .....	453
3.1.1. Breve recordatorio de la ley de Gauss .....	453
3.1.2. Importancia del flujo magnético .....	454
3.2. Bobinas e inductores .....	455
3.2.1. Condensadores y bobinas .....	455
3.2.2. Flujo en el interior del solenoide .....	455
3.2.3. Concepto de «inductancia» .....	457
3.2.3.1. Tipos de inductancia .....	458
3.2.4. Ecuación de la bobina .....	458
3.2.5. Construcción de una bobina .....	459
3.2.6. Dinámica de la bobina .....	459
4. Algunos sistemas electrodinámicos .....	460
4.1. Transformadores .....	461
4.1.1. Descripción .....	461
4.1.2. Análisis físico .....	462
4.1.3. Relaciones de transformación .....	465
4.1.4. Características de los transformadores .....	466
4.1.5. Aplicaciones .....	466
4.2. Alternadores .....	467
4.2.1. Descripción .....	467
4.2.2. Análisis físico .....	468
4.2.3. Características básicas de un alternador .....	470
5. Energía almacenada en el campo magnético .....	470
5.1. Densidad de energía del campo magnético .....	470
5.2. Energía almacenada en una bobina .....	471
5.2.1. Demostración de la expresión de la energía en una bobina ..	472
5.2.2. Energía de una bobina solenoidal .....	473
6. Ley de Ampère-Maxwell: segunda unificación de los campos .....	475
6.1. El fallo de la ley de Ampère .....	475
6.2. La ley de Ampère-Maxwell .....	477
6.2.1. Generalización de la ley de Ampère en el caso de un conden- sador .....	477

6.2.2. Ley de Ampère-Maxwell al completo .....	479
6.2.3. Importancia de la ley .....	479
6.3. Segunda unificación de los campos .....	480
7. Ecuaciones de Maxwell .....	481
7.1. Cuando el tiempo no es un problema .....	481
7.2. La electrodinámica clásica al completo .....	482
Actividades de autocomprobación .....	484
Referencias bibliográficas .....	487
<b>Unidad didáctica 9. Introducción a las ondas .....</b>	<b>489</b>
Objetivos de la unidad .....	492
1. Introducción .....	493
2. ¿Qué son las ondas? .....	493
2.1. Una primera definición .....	493
2.2. ¿Qué es la ecuación de onda? .....	495
2.3. ¿De dónde sale la ecuación de onda? Modelado de sistemas .....	496
2.3.1. Modelado del campo electromagnético .....	496
2.3.2. Modelado de una cuerda tensa .....	497
2.4. ¿Qué es una perturbación? .....	498
2.4.1. Perturbación en la superficie de un estanque .....	498
2.4.2. Perturbación en una cuerda tensa .....	499
2.4.3. Perturbación electromagnética .....	499
2.5. ¿Cómo es una onda? las funciones de onda .....	500
2.6. ¿Qué es lo que determina una solución u otra? ¿Qué es lo que genera una onda? .....	502
2.7. ¿Qué es lo que realmente se propaga en una onda? .....	503
3. La ecuación de onda .....	504
3.1. ¿Cómo es la ecuación de onda? Análisis de la ecuación de onda escalar en una dimensión .....	504
3.2. ¿Qué significa la ecuación de onda? .....	506
3.3. Una ecuación lineal: el principio de superposición de las ondas .....	509
3.4. ¿Qué significa el término $v^2$ ? .....	511
3.4.1. ¿Es $v$ siempre una constante? .....	513
3.5. Ecuación de onda en dos y tres dimensiones .....	513

3.6. ¿Y las perturbaciones vectoriales? .....	514
3.7. Otras ecuaciones parecidas, pero que no son ecuación de onda .....	516
3.7.1. Ecuación de calor .....	516
3.7.2. Ecuación de advección .....	517
4. La solución general a la ecuación de onda .....	517
4.1. ¿Cómo son esas soluciones generales? .....	518
4.2. ¿Cumple esta solución general la ecuación de onda? .....	519
4.3. Demostración de D'Alembert .....	520
4.4. ¿Podemos sacar algo en claro de la solución general? .....	524
4.5. Condiciones de contorno para la solución de D'Alembert .....	529
5. Soluciones armónicas a la ecuación de onda .....	531
5.1. El coseno (o el seno) como solución de la ecuación de onda .....	531
5.2. Soluciones monocromáticas .....	533
5.2.1. La exponencial compleja .....	533
5.2.2. ¿Es la exponencial compleja una solución de la ecuación de onda? .....	534
5.3. Expresiones armónicas sin la variable tiempo .....	535
5.4. Características de las soluciones armónicas .....	535
5.4.1. Frecuencia, periodo y pulsación o frecuencia angular .....	537
5.4.2. Amplitud .....	539
5.4.3. Longitud de onda, número de onda o constante de propagación .....	540
5.4.4. Relación entre frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación .....	541
5.4.5. Fase de la onda y fase inicial o fase en el origen .....	542
6. Superposición de ondas armónicas: interferencia .....	543
6.1. Ondas armónicas unidimensionales .....	544
6.1.1. Dos ondas armónicas de la misma frecuencia que se propagan en el mismo sentido .....	544
6.1.2. Recuerda: a veces, luz + luz es oscuridad – interferencia destructiva .....	545
6.1.3. Superposición de dos ondas de la misma frecuencia que se propagan en sentidos contrarios .....	547
6.1.4. Ondas que no son ni totalmente estacionarias ni totalmente viajeras .....	550
6.2. Ondas armónicas multidimensionales .....	551

7. Otros comportamientos asociados a las ondas .....	553
7.1. Reflexión y transmisión .....	553
7.1.1. Reflexión en una cuerda tensa .....	553
7.1.2. Reflexión total de ondas.....	556
7.1.3. Reflexión parcial y transmisión .....	556
7.2. Refracción .....	557
7.3. El efecto Doppler .....	559
7.4. Difracción .....	561
8. La ondas dentro de las ecuaciones de Maxwell .....	562
Actividades de auto comprobación .....	566
Referencias bibliográficas .....	570
<b>Unidad didáctica 10. Introducción a la electrónica de estado sólido</b> .....	<b>571</b>
Objetivos de la unidad .....	573
1. Introducción .....	574
2. Materiales semiconductores .....	574
2.1. Conductores, aislantes y semiconductores: aproximación cristalina ...	574
2.1.1. Conductores .....	574
2.1.2. Aislantes .....	575
2.1.3. Semiconductores .....	576
2.2. Conductores, aislantes y semiconductores: aproximación de bandas de energía .....	578
2.2.1. Concepto de «bandas de energía» .....	578
2.2.2. Tipos de materiales .....	579
2.2.3. Electrones en las bandas de valencia y conducción .....	580
2.3. Corriente eléctrica en materiales semiconductores .....	581
2.3.1. Corriente de conducción: electrones, huecos y conductividad del material .....	581
2.3.2. Corriente de difusión: ley de Fick .....	585
2.4. Tipos de materiales semiconductores .....	588
2.4.1. Intrínsecos .....	588
2.4.2. Ley de acción de masas .....	589
2.4.3. Dopado: semiconductores extrínsecos .....	590

2.5. Cálculo de concentraciones .....	591
2.5.1. Ionización total .....	591
2.5.2. Ley de neutralidad del semiconductor .....	592
2.5.3. Ley de acción de masas en semiconductores extrínsecos .....	592
3. Uniones <i>P-N</i> : el diodo .....	593
3.1. Estructura de la unión <i>P-N</i> .....	594
3.2. Análisis del equilibrio de la unión <i>P-N</i> .....	594
3.2.1. Concentraciones de portadores .....	594
3.2.2. Difusión de portadores .....	595
3.2.3. Campo interno y arrastre de portadores .....	596
3.2.4. Equilibrio de corrientes .....	597
3.2.5. Zona de vaciamiento y barrera de potencial interna .....	597
3.3. Análisis de la dinámica de la unión <i>P-N</i> .....	598
3.3.1. Unión <i>P-N</i> en directa .....	599
3.3.2. Unión <i>P-N</i> en inversa .....	601
3.3.3. Comportamiento en directa e inversa .....	602
3.3.4. Ecuación del diodo de Shockley .....	602
3.4. Símbolo circuital .....	604
3.5. Aproximaciones de gran señal .....	604
3.5.1. Aproximación 1: rectificador ideal .....	604
3.5.2. Aproximación 2: rectificador ideal con tensión de codo .....	607
3.6. Aplicaciones de la unión <i>P-N</i> .....	610
3.6.1. Rectificadores .....	611
3.6.2. Diodos LED .....	611
3.6.3. Láser de estado sólido .....	611
3.6.4. Células solares fotovoltaicas .....	611
3.6.5. Construcción de dispositivos más complejos .....	611
3.6.6. Otras aplicaciones .....	612
Actividades de autocomprobación .....	614
Referencias bibliográficas .....	617

