

Campos electromagnéticos

Dios Otín, Federico
Artigas García, David
Recolons Martos, Jaume
Comerón Tejero, Adolfo
Canal Bienzobal, Ferran

Presentación

Este libro fue concebido inicialmente como una transcripción, ligeramente reelaborada, de los apuntes de clase que, en los últimos años, se han venido impartiendo en la asignatura de *Campos electromagnéticos*, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona.

Nuestra intención primera fue la de proporcionar a los estudiantes un texto de referencia, en el que se contuviera el armazón teórico de la asignatura, junto con numerosos ejemplos y problemas resueltos. Posteriormente esa idea inicial fue modificándose y, al fin, el texto se presenta como un cuerpo teórico completo, si bien se sigue ciñendo principalmente a aquellos contenidos que son relevantes dentro de la asignatura.

Probablemente es pretencioso, e incluso ingenuo, decir que el libro viene a llenar un hueco dentro de la literatura científica dedicada a la teoría electromagnética, que es amplísima. Sí se puede afirmar, sin embargo, que muchos de los textos clásicos han quedado como libros de consulta, y, a menudo, para el profesor o el especialista, más que para el estudiante que trata de introducirse por vez primera, y con cierto rigor, en estos temas. Esto es así porque suelen enfocarse las cuestiones desde presupuestos conceptuales y de método, por encima de las posibilidades reales de un alumno de pregrado.

En el texto hemos tratado de buscar un equilibrio adecuado entre la explicación de los fenómenos físicos y su descripción formal. Aun así somos conscientes de que el estudiante, en ocasiones, puede llegar a pensar que la dificultad real de algunos temas es más matemática que física. Esta percepción está justificada, pero sólo parcialmente: debe admitirse que la propia materia que es objeto de estudio -los campos y las ondas electromagnéticas- son realidades complejas, en sí mismas y en sus interrelaciones con los cuerpos materiales, y que precisan de una herramienta poderosa para ser abarcadas en un modelo compacto. Tal herramienta es el análisis vectorial. Todavía nos atreveríamos a añadir que sin un enfoque formal no es posible alcanzar una comprensión, ni siquiera mediana, de los fenómenos físicos que aquí se tratan. Es por eso que el estudiante debe tratar de hacer una doble ascensión, a medida que avanza en la materia, para comprender, por un lado, la esencia del problema físico, y, por otro, cómo la descripción formal con que se presenta es apropiada y abarca perfectamente todos los aspectos de la cuestión. En algún momento esta tarea puede resultar más difícil, y el estudiante no sabe cuál de los apoyos -el físico-conceptual o el matemático-formal- le está presentando dificultades. A lo largo del texto hemos tratado de

dar las suficiente pistas como para que esos problemas puedan ser superados con una relectura atenta de algunos de los párrafos previos a aquél en el que se presentó la dificultad.

El texto está dividido en seis capítulos. El capítulo primero es un repaso de Electrostática y Magnetostática. Sirve como introducción a los contenidos y herramientas utilizados en el resto del libro, y el alumno está ya suficientemente familiarizado con muchos de sus contenidos, que se han visto en cursos anteriores de Física. La asignatura de *Campos electromagnéticos*, tal como se ve en muchas escuelas técnicas, y particularmente en la ETSET de Barcelona, comienza con el capítulo segundo. En él se tratan las ecuaciones de Maxwell, de su significado físico y de los principios de índole más general que se derivan de ellas, que se aplican profusamente de allí en adelante. El capítulo tercero está dedicado a las ondas planas uniformes, y constituye el meollo de la asignatura, porque a pesar de no ser un tema de especial dificultad, es la base inmediata para el estudio de muchos otros fenómenos de interés práctico en el área de la Telecomunicación. El capítulo cuarto trata de la incidencia de ondas planas sobre medios materiales. Como es habitual se reduce a los casos sencillos de incidencia sobre superficies planas. De nuevo se trata de un tema muy asequible, pero que plantea situaciones de elevado interés conceptual y práctico. Los dos últimos capítulos están dedicados a cuestiones más aplicadas, como son la propagación guiada (capítulo quinto) y la radiación de antenas elementales y de tipo dipolo (capítulo sexto). Estos dos últimos temas constituyen una introducción inmediata a algunas asignaturas de cursos posteriores.

Para finalizar, cabe tan sólo pedir comprensión al lector por los posibles errores o deficiencias que pueda hallar en el texto, que, en cualquier caso, ha sido cuidadosamente revisado. Las diferencias de estilo que pueden detectarse a lo largo del libro obedecen a que la redacción de cada capítulo ha sido realizada por un autor diferente, si bien con un acuerdo general previo acerca de los contenidos. En las revisiones conjuntas posteriores no hemos tratado de limar esas diferencias, que son legítimas y dan, incluso, mayor riqueza a la obra. Lo mismo puede decirse respecto a posibles repeticiones de algunos conceptos en diferentes capítulos. Pensamos que conviene dejarlas para hacer más asequible la introducción de los nuevos temas que van apareciendo.

No podemos dejar de agradecer el ánimo constante que hemos recibido de algunas de las personas de Ediciones UPC, que publica esta obra. También queremos reconocer la tarea y las aportaciones de otros profesores del Departamento, como son Lluís Torner, Juan P. Torres y Jordi Hernández, que en años anteriores han impartido la asignatura de Campos, y que no han tenido tiempo material para embarcarse personalmente en la confección del libro.

Los autores
Barcelona, julio de 1998.

Índice

Capítulo 1 Campos eléctricos y magnéticos en condiciones estáticas

1.1 El campo eléctrico en el vacío	15
1.1.1 Ley de Coulomb. Definición de campo eléctrico	15
1.1.2 Cargas puntuales y distribuciones de carga	16
1.1.3 Ley de Gauss	21
1.1.4 Potencial eléctrico. Carácter conservativo del campo electrostático	23
1.1.5 Representación espacial del campo y del potencial: líneas de campo y superficies equipotenciales	26
1.1.6 Relación entre el potencial eléctrico y la densidad de carga	27
1.1.7 El campo eléctrico y el potencial en conductores	30
1.1.8 El campo eléctrico en la superficie de un conductor	35
1.1.9 Problemas de potencial. Ecuaciones de Laplace y Poisson	37
1.1.10 Condiciones que determinan el campo en una región	43
1.1.11 Energía electrostática	48
1.1.12 Energía electrostática asociada al campo eléctrico	50
1.1.13 Aproximación del potencial a grandes distancias. Desarrollo multipolar del potencial	52
1.1.14 Dipolo real y dipolo ideal	57
1.1.15 El dipolo ideal en presencia de campos eléctricos externos	58
1.2 El campo electrostático en presencia de medios dieléctricos	58
1.2.1 Vector polarización	59
1.2.2 Relación entre el vector polarización y el campo eléctrico. Tipos de dieléctricos	61
1.2.3 Ley de Gauss en medios dieléctricos. Vector desplazamiento eléctrico	63
1.2.4 Ecuación de Poisson generalizada	68
1.2.5 Energía electrostática en presencia de medios dieléctricos	70
1.2.6 Sistemas de conductores. Condensadores	71

1.3 El campo magnetostático en el vacío	76
1.3.1 Introducción	76
1.3.2 Densidad e intensidad de corriente. Ley de Ohm	77
1.3.3 Ecuación de continuidad. Corrientes estacionarias.	80
1.3.4 Ley de Biot y Savart	81
1.3.5 Carácter solenoidal del campo magnético	85
1.3.6 Ley de Ampère	86
1.3.7 Cálculo de B mediante la ley de Ampère en forma integral	87
1.3.8 Aproximación de B a grandes distancias. Momento dipolar magnético	93
1.4 Campos magnéticos en medios materiales	96
1.4.1 Fuerzas sobre un dipolo magnético	96
1.4.2 Vector magnetización	97
1.4.3 Densidades de corriente de magnetización	98
1.4.4 Ley de Ampère en medios magnéticos. Intensidad de campo magnético	99
1.4.5 Relación entre el campo magnético y el vector magnetización	99
1.4.6 Tipos de medios magnéticos.	105
1.4.7 Flujo magnético, inductancia y energía magnética	109
Problemas.	113

Capítulo 2 Ecuaciones de Maxwell

2.1 Ecuaciones de Maxwell en forma integral en el vacío	122
2.1.1 Ley de Gauss para el campo eléctrico	122
2.1.2 Ley de Gauss para el campo magnético	123
2.1.3 Ley de Faraday	124
2.1.4 Ley de Ampère-Maxwell	128
2.1.5 Principio de conservación de la carga	132
2.1.6 Ecuaciones fundamentales del electromagnetismo	134
2.2 Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial	134
2.2.1 Significado del rotacional y de la divergencia	135
2.2.2 Forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell	142
2.3 Ecuaciones de Maxwell en medios materiales	148
2.3.1 Campos en presencia de medios conductores	148
2.3.2 Materiales dieléctricos	151
2.3.3 Materiales magnéticos	156
2.3.4 Ecuaciones fundamentales del electromagnetismo en medios materiales	161
2.4 Condiciones de contorno	162
2.4.1 Continuidad de los campos eléctricos	163
2.4.2 Continuidad de los campos magnéticos	167

2.5	Energía de los campos electromagnéticos	172
2.5.1	Potencia aplicada sobre portadores de carga	173
2.5.2	Principio de conservación de la energía. Teorema de Poynting	174
2.6	Aproximación estática de las ecuaciones de Maxwell	179
2.6.1	Electrostática	180
2.6.2	Magnetostática	181
2.7	Ecuaciones de Maxwell en régimen senoidal permanente	182
2.7.1	Fasores y campos instantáneos	183
2.7.2	Ecuaciones de Maxwell en R.S.P.	185
2.7.3	Fasores y transformada de Fourier	195
	Problemas	198

Capítulo 3 Ondas planas uniformes

3.1	Ecuación de onda	203
3.1.1	Ondas planas uniformes con dependencia espacio-temporal arbitraria	205
3.2	Ondas planas uniformes en régimen senoidal permanente	213
3.2.1	Ecuación de onda en régimen senoidal permanente	218
3.2.2	Solución correspondiente a la onda plana uniforme	219
3.2.3	Características de la onda plana uniforme	223
3.2.4	Densidad de flujo de potencia asociada a la onda	238
3.3	Polarización de ondas planas uniformes en R.S.P.	242
3.3.1	Descripción matemática de la polarización	242
3.3.2	Características de la elipse de polarización	247
3.3.3	Casos especiales: polarización lineal y polarización circular	253
3.4	Propagación de ondas planas uniformes en medios con pérdidas	260
3.4.1	Permitividad y permeabilidad complejas	260
3.4.2	Ondas planas uniformes en un medio con pérdidas	264
3.4.3	Casos límite: buen dieléctrico y buen conductor	269
	Problemas	277

Capítulo 4 Incidencia de ondas planas sobre medios materiales

4.1	Introducción. Condiciones de contorno de las ecuaciones de Maxwell	281
4.2	Incidencia normal sobre conductores perfectos	284
4.2.1	Reflexión en la superficie de un conductor perfecto	284
4.2.2	Ondas estacionarias	294
4.3	Incidencia normal sobre medios dieléctricos.	299
4.3.1	Reflexión y transmisión en la superficie de un medio dieléctrico	299
4.3.2	Ondas parcialmente estacionarias	304

4.4 Incidencia oblicua sobre conductores perfectos	308
4.4.1 Planteamiento del problema	308
4.4.2 Ondas estacionarias mixtas	315
4.5 Incidencia oblicua sobre dieléctricos	323
4.5.1 Leyes de Snell para la reflexión y la refracción de ondas planas	324
4.5.2 Ecuaciones de Fresnel	325
4.5.3 Ángulo de Brewster	333
4.5.4 Ángulo crítico. Reflexión total en un dieléctrico	337
4.6 Incidencia sobre un buen conductor	348
4.7 Incidencia normal en multicapas	354
4.6.1 Impedancia de onda generalizada	356
4.6.2 Coeficiente de reflexión generalizado	358
Problemas	364

Capítulo 5 Guías de onda

	369
5.1 Guías de onda y líneas de transmisión.	370
5.2 Guías conductoras de sección rectangular.	373
5.2.1 Modos de tipo transversal eléctrico (TE)	375
5.2.2 Modos de tipo transversal magnético (TM)	377
5.2.3 Modos guiados y modos en corte. Curvas de dispersión	380
5.2.4 Modo dominante TE_{10}	381
5.2.5 Potencia transmitida.	382
5.2.6 Atenuación.	384
5.3 Guías conductoras de sección circular.	385
5.3.1 Modos TM.	387
5.3.2 Modos TE.	388
5.3.3 El cable coaxial. Modos TEM.	390
5.4 Cavidades resonantes de paredes conductoras.	391
5.4.1 Modos TE.	393
5.4.2 Modos TM.	393
5.4.3 Factor Q de la cavidad y energía almacenada.	395
5.5 Guías de onda dieléctricas	396
5.5.1 Guías dieléctricas planas.	397
5.5.2 Modos TE y modos TM. Curvas de dispersión.	404
5.5.3 Modos guiados y modos radiados.	405
5.6 Fibras ópticas.	408
Problemas.	

Capítulo 6 Radiación de antenas elementales

6.1 Fundamentos de la radiación electromagnética	413
6.1.1 Fuentes de radiación	415
6.1.2 Potenciales dinámicos	416
6.1.3 Ecuaciones de los potenciales en régimen senoidal permanente	419
6.2 Dipolo eléctrico oscilante	420
6.2.1 Densidad de carga y corriente en el dipolo eléctrico oscilante	420
6.2.2 Potencial vector generado por el dipolo eléctrico	421
6.2.3 Cálculo de los campos E y H	424
6.2.4 Campos radiados	425
6.2.5 Características de radiación del dipolo eléctrico	426
6.2.6 Campos inducidos	429
6.3 Radiación simultánea de dos dipolos	430
6.3.1 Campo radiado	431
6.3.2 Resistencia de radiación y ganancia directiva	432
6.4 Radiación de una antena larga de tipo dipolo	436
6.5 Emisión en campo lejano: generalización	438
Problemas	440
 Anexo A: Sistemas de coordenadas	 445
Anexo B: Fórmulas de análisis vectorial	449
Anexo C: Funciones de Bessel	451
Anexo D: La distribución delta de Dirac	455
Soluciones a los problemas	459
Bibliografía	469
Índice alfabético de materias	471

Bibliografía

Textos de referencia y consulta

Electromagnetic fields and waves. Paul Lorrain, Dale R. Corson and Françoise Lorrain. Freeman & Co., 1988. Existe la traducción al castellano de una edición anterior: *Campos y Ondas Electromagnéticos*. Paul Lorrain, Dale R. Corson. Selecciones Científicas, 1972.

Electromagnetic fields and waves. Magdy Iskander. Prentice Hall, 1992.

Electromagnetismo aplicado. Martin.A. Plonus. Reverté, 1982.

Elements of Engineering Electromagnetics, 3rd ed. N. Narayana. Rao. Prentice Hall, 1993.

Fundamentos de electromagnetismo para ingenieros. David K. Cheng. Addison-Wesley iberoamericana, 1997.

Campos electromagnéticos. R. K. Wangsness. Limusa, 1983.

Electromagnetismo. John D. Kraus. McGraw-Hill, 1986 .

Fundamentos de la teoría electromagnética. John R. Reitz, Frederick J.Milford, Robert W. Christy. Addison-Wesley, 1995.

Engineering Electromagnetism. A. J. Baden Fuller. John Wiley & sons, 1993.

Textos complementarios

Fields and waves in Communications Electronics. S. Ramo, F. J. Whinnery , T. V. Duzer, John Wiley and sons. 1984.

The Feynman lectures on Physics, vol.II. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. Addison-Wesley, 1964 (versión en castellano de ed. Fondo Educativo Interamericano, 1972).

Electromagnetic fields and energy. Hermann A. Haus , James R.Melcher. Prentice Hall, 1989.

Classical Electrodynamics. John. D. Jackson. John Wiley & sons, 1975 (existe una versión en castellano de Ed. Alhambra, 1980).

Advanced Engineering Electromagnetics. Constantine A. Balanis. John Wiley & sons, 1989.

Electricity and Magnetism. Edward. M. Purcell. McGraw-Hill, 1966 (versión en castellano de Ed. Reverté, 1992).

Classical Electricity and Magnetism. W. Panofsky and M. Phillips. Addison-Wesley, 1971.

Principles of Electricity and Magnetism. Emerson M. Pugh, Emerson W. Pugh. Addison-Wesley, 1970.

Electromagnetic Theory. Julius A. Stratton. McGraw-Hill, 1941.

Electromagnetics. Robert S. Elliot. McGraw-Hill, 1966.

Ingeniería de Radio. Frederick E. Terman. Ed. Arbó, 1952 (traducción al castellano de Radio Engineering de ed. McGraw-Hill).

Las teorías de los campos de fuerza. William Berkson. Alianza Editorial, 1981 (traducción al castellano de *Fields of Force - The development of a world view from Faraday to Einstein*, Routledge & Kegan Paul, 1974).

Índice alfabético de materias

- Ampère
 - ley de, 87, 99, 128
 - ley de la fuerza de, 77
- Amperio, unidad de intensidad de corriente (A)
- Ángulo sólido, 21
- Anisótropos, materiales, 61
- Apantallamiento eléctrico, 43, 44, 414
- Apertura numérica de una fibra, 346-347
- Atenuación
 - constante de, 265, 348, 383-384
 - de ondas planas, 267, 348
 - en cavidades resonantes, 393-395
 - en guías conductoras, 382-384
- Autoinductancia, 110
 - de una bobina toroidal, 111
 - de un cable coaxial, *Prob.1.23*
 - de una línea bifilar, *Prob.1.24*
- Bessel, funciones de, 386-387, *Anexo C*
- Biot y Savart, ley de, 82
- Brewster, ángulo de, 333-337
- Cable coaxial, 41, *Prob. 1.23*, 388-390
- Campo
 - conservativo, 24, 37
 - electrostático, 16 y ss.
 - electrostático en la atmósfera, *Prob.1.1*
 - despolarizante, 67
 - inducido o cercano, 429-430
 - irrotacional, 25
 - local, 59
 - magnético terrestre, *Prob.1.20*
 - magnetostático, 76 y ss.
 - radiado o lejano, 425-426
 - solenoidal, 85-86
- Capacidad
 - coeficientes de, 72
 - de un cable coaxial, 73
 - de un condensador esférico, 74
 - de un condensador plano, 73
 - de una línea con retorno por tierra, *Prob.1.10*
- Carga eléctrica
 - conservación de la, 67, 132
 - densidad superficial de, 17, 290, 322
 - densidad volúmica de, 17
 - imagen, 46
 - libre, 67
 - ligada, 62-63, 67, 153-154
 - puntual, 16
- Cavidad resonante, 296, 390-394
- Circuitos acoplados magnéticamente, 110
- Coefficientes
 - de reflexión y transmisión, 330, 332
 - de reflectividad y transmitividad, 333
- Coercitivo, campo, 108
- Condensador, 73-74, *Probs. 1.8, 1.11, 1.12*
- Condiciones de contorno, 43-44, 163-172, 281-283
- Conducción, corriente de, 79
- Conductividad, 79, 149-150
- Conductor, 30
 - buen conductor, 269, 348
 - carga en un, 31, 36-37
 - campos en un, 31, 35, 148
- Conservación
 - de la carga, 67, 132
 - de la energía, 174, 285
- Constante dieléctrica, 64

- compleja, 263, 348
- Continuidad, ecuación de, 132, 415, 420
- Coordenadas, sistemas de, *Anexo A*
- Corriente
 - de conducción, 79
 - de convección, 79
 - de desplazamiento, 130
 - de magnetización, 98
 - estacionaria, 80, 415
 - densidad superficial de, 77, 291, 383
 - densidad volúmica de, 77, 274
- Coulomb
 - ley de, 15
 - norma de, 90
- Coulombio, unidad de carga (C)
- Corte
 - frecuencia de, 378
 - modos en, 377-379
- Crítico, ángulo, 337-339
- Cuadripolo, 54-55
- Curie, temperatura de, 108
- D'Alembert, ecuación de, 206
- Derivada direccional, 25
- Desarrollo multipolar, 52-56
- Desplazamiento eléctrico, 64, 154, 261
- Diagrama de radiación, 428
- Diamagnetismo, 105
- Dieléctricos, 58, 151
- Dipolo
 - eléctrico real, 54
 - eléctrico ideal, 57
 - eléctrico oscilante, 420-430
 - en λ medios, 436-438
 - fuerza sobre un, 58, 96
 - magnético real, 95
 - magnético ideal, 96
 - magnético oscilante, *Prob. 6.6*
- Dirac, función delta de, 420, *Anexo D*
- Directividad, 429
- Dirichlet, problema de, 44
- Dispersión, ecuación de, 379, 386, 400
- Divergencia, teorema de la, 135
- Dominios ferromagnéticos, 106-107
- Ecuación
 - de continuidad, 132, 415, 420
 - de onda homogénea, 205
 - de onda inhomogénea, 204
- Ecuaciones constitutivas del medio, 203
- Electrostática, *Cap. I*, 180-181
- Elipse de polarización, 243
- Efecto pelicular, 271-272, 350
- Energía
 - de un sistema de carga puntuales, 49-50
 - de un continuo de carga, 50-51, 70-71
 - densidad de, 176, 190-191
 - electromagnética, 172, 393
 - magnética, 109-110
 - potencial, 48
- Esfera conductora, 32, 40
- Esfera dieléctrica, *Prob. I.6*
- Espira de corriente, 90
- Estacionario, régimen, 76, 355
- Factor de calidad, Q, 393
- Faraday, ley de, 109, 124-128
- Faradio, unidad de capacidad (F)
- Fase, velocidad de, 234, 266, 340, 379
- Fasor, 183-184, 195
- Ferromagnetismo, 106
- Fibra óptica, 346, 405-408
- Flujo
 - de campo eléctrico, 21, 122
 - de campo magnético, 109, 126-128
 - de densidad de potencia, 176, 285
- Fourier, transformada de, 195
- Fresnel, fórmulas de, 330, 332
- Fuerza
 - de Lorentz, 81, 134
 - electromotriz, 109, 125
 - ejercida por un imán, *Prob. I.21*
 - entre corrientes, 76-77
 - entre las placas de un condensador, *Prob. I.7*
 - sobre una carga en movimiento, *Probs. I.16, I.17, I.18*
- Ganancia directiva, 429
- Gauss
 - unidad de campo magnético CGS (G)
 - ley de, 21, 63-65, 122-124
 - teorema de, 135
- Guías de onda,
 - de paredes conductoras, 320, 370-388
 - dieléctricas, 345, 395-405
- Gradiente, 25
- Green, teorema de, 43

Hall, efecto, *Probs. I.19, I.22*
Helmholtz,
 ecuación de, 219
 teorema de, 90
Henrio, unidad de inductancia (H)
Histéresis, curva de, 108

Imágenes, método de las, 45-48, *Prob. I.4*
Imán permanente, 108
Impedancia
 de una antena, 427, 433
 intrínseca de un medio, 208, 264
 de onda, 356-358
 superficial de un conductor, 273, 382
Incidencia,
 ángulo de, 309
 plano de, 308-309
Inducción electromagnética, 109
Inductancia mutua entre circuitos, 110
Integración, ejemplos de, 18-20, 82-85
Intensidad
 de campo magnético, 99, 159
 de corriente, 78

Joule, pérdidas por efecto, 109
Julio, unidad de energía (J)
Kronecker, delta de, 53

Laplace, ecuación de, 38,
Laplaciana, 38, 204
Láser, 298-299
Legendre, polinomios de, 39
Lenz, ley de, 126-127
Línea de transmisión, 358, 369-370
Líneas de campo, 26, 29
Longitud de onda
 en el espacio libre, 225
 en guías de onda, 379
Lorentz
 fuerza de, 81
 norma de, 417, 419
Magnetización
 corrientes de, 158
 curva de, 106
 vector, 98, 157
Magnetostática, *Cap. I*, 181-182
Maxwell, ecuaciones de, 121, 134, 162, 182

Medios
 anisótropos, 61
 conductores, 30, 148
 dieléctricos, 58, 151
 magnéticos, 96, 156
 no lineales, 62
Modos en guías de onda, 321, 345
 en corte, 377
 guiados, 377, 380
 radiados, 404-405
 TE, 372, 373-375, 387-388
 TEM, 388-390
 TM, 372, 375-376, 385-387
Momento
 cuadripolar, 53
 dipolar eléctrico, 53
 dipolar magnético, 94
 de una fuerza, 97
Motor, *Prob. I.22*
Movilidad de un portador de carga, 79
Multicapas dieléctricas, 354

Neumman,
 funciones de, 407, *Anexo C*
 problema de, 44
Número de onda, 219

Oersted, 76
Ohm
 unidad de resistencia (Ω)
 ley de, 79
Onda
 forma de, 207
 ecuación de, 204-206
 esférica, 424
 estacionaria, 294-296, 315-320
 evanescente, 340
 localmente plana, 425-426
 parcialmente estacionaria, 304-307
 plana uniforme, 201-276
 viajera, progresiva o regresiva, 207
Operadores diferenciales, *Anexo B*
Paramagnetismo, 105
Pérdidas
 ángulo de, 265
 de conducción, 262-263, 383-384
 dieléctricas, 260-262, 382-383
 en conductores, 174

- tangente de, 266
- Permeabilidad, 77, 100, 262
- Permitividad, 15, 64, 261-262
- Plano
 - de carga homogénea, 18
 - de corriente uniforme, 215
 - de fase constante, 234
 - de incidencia, 308-309
- Poisson, ecuación de, 38, 68
- Polarización
 - carga de, 63, 67
 - de ondas planas, 241-253
 - circular, 255-257
 - elíptica, 243-246
 - lineal, 253-255
 - vector, 59-60, 152
- Polarizador, 257, *Prob. 3.10*
- Potencia
 - densidad de, 176
 - de una onda plana, 238-240
 - de un modo, 381
 - radiada por una antena, 426, 432
- Potencial
 - electrostático, 23
 - escalar eléctrico, 417
 - problemas de, 37-48
 - vector magnético, 89, 417
- Potenciales retardados, 418
- Poynting
 - teorema de, 174
 - vector de, 176, 188-189
- Profundidad de penetración, 271, 349
- Propagación
 - constante de, 266
 - ionosférica, 342-344
- Radiación
 - de un dipolo eléctrico, 426-429
 - de un dipolo magnético, *Prob. 6.6*
 - de un dipolo en λ medios, 436
- Ranura, en una guía de onda, *Prob. 5.9*
- Recubrimiento antirreflectante, 362-364
- Reflexión,
 - ángulo de, 310
 - total, 337-342
- Refracción,
 - ángulo de, 324
 - índice de, 304
- Régimen senoidal permanente, 182-183, 185-195
- Relación axial, 247-248
- Relación de onda estacionaria, 306
- Remanencia, 108
- Resistencia, 177-178
 - de radiación, 433
- Resonador, 390-391
- Resonancia, frecuencia de, 392
- Rotacional, teorema del, 138
- Saturación de la magnetización, 106
- Segmentos, método de los, 92-93
- Semiconductores, corriente en, 80
- Sentido de giro, 248
- Siemens, unidad de admitancia (S)
- Snell, leyes de, 324-325
- Stokes, teorema de, 138
- Superficie equipotencial, 27, 30
- Superposición, principio de, 16, 28, 243, 257, 433
- Susceptibilidad
 - dieléctrica, 61-62, 154-155
 - magnética, 100, 159
- Tesla, unidad de campo magnético B (T)
- Trayectoria de una carga, *Probs. 1.16, 1.17, 1.18*
- Unicidad, teorema de, 43
- Vector de onda, 219
- Velocidad
 - de arrastre, 79
 - de fase, 234, 266, 340, 379
 - de la luz, 206
- Voltio, unidad de potencial (V)
- Watio, unidad de potencia (W)
- Weber, unidad de flujo magnético (Wb)
- Weiss, teoría de los dominios de, 106-107