

---

# Contenido

---

<b>PREFACIO</b>	<b>xvii</b>
<b>1 SISTEMAS DE COORDENADAS E INTEGRALES</b>	<b>1</b>
1.1 Conceptos generales	1
1.2 Coordenadas de un punto	2
1.3 Los campos escalares y cómo se transforman	4
1.4 Campos vectoriales y cómo se transforman	8
1.5 Integrales	30
1.5.1 Integrales sobre una trayectoria (integrales de línea)	31
1.5.2 Integrales de superficie	38
1.5.3 Integrales de volumen	43
1.5.4 Igualdad entre integrandos	44
1.6 Resumen	47
Preguntas de repaso	48
Problemas	48
Bibliografía	56

## **2 GRADIENTE, DIVERGENCIA Y ROTACIONAL** **57**

- 2.1 Conceptos generales 57
- 2.2 Gradiente 57
  - 2.2.1 *Algunas propiedades del operador gradiente*, 61
- 2.3 El teorema de la divergencia y la divisibilidad del flujo 66
- 2.4 El teorema de Stokes y la divisibilidad de la circulación 74
- 2.5 Propiedades de la divergencia y del rotacional 86
  - 2.5.1 *Campos vectoriales con divergencia y rotacional nulos*, 86
  - 2.5.2 *Identidades vectoriales*, 93
- 2.6 Resumen 95
  - Preguntas de repaso 97
  - Problemas 97
  - Bibliografía 100

## **3 CAMPOS ELECTROSTÁTICOS** **101**

- 3.1 Conceptos generales 101
- 3.2 La ley de Coulomb 101
  - 3.2.1 *La ley de Coulomb para cargas puntuales*, 103
  - 3.2.2 *Distribuciones volumétricas, superficiales y lineales de carga*, 107
- 3.3 Propiedades del campo electrostático 118
  - 3.3.1 *Integrales de circulación del campo eléctrico*, 119
  - 3.3.2 *Integrales de flujo del campo eléctrico sobre superficies cerradas (ley de Gauss)*, 120
  - 3.3.3 *Líneas de flujo y tubos de flujo del campo eléctrico*, 126
  - 3.3.4 *Cómo se encuentra el campo eléctrico a partir de la ley de Gauss*, 129
  - 3.3.5 *La forma puntual de la ley de Gauss*, 135
- 3.4 Resumen 139
  - Preguntas de repaso 141
  - Problemas 141
  - Bibliografía 146

## **4 CAMPOS MAGNETOSTÁTICOS** **147**

- 4.1 Conceptos generales 147
- 4.2 Elemento de corriente 148

- 4.3 Ley de Biot-Savart 149
  - 4.3.1 *La ley de Biot-Savart para elementos filamentosos de corriente*, 149
  - 4.3.2 *Distribuciones volumétricas y superficiales de corrientes*, 152
- 4.4 Propiedades del campo magnetostático 169
  - 4.4.1 *Integrales de flujo del campo magnético*, 169
  - 4.4.2 *Líneas de flujo y tubos de flujo del campo magnético*, 171
  - 4.4.3 *Integrales de circulación del campo magnético*, 171
  - 4.4.4 *Cómo determinar el campo magnético a partir de la ley de Ampere*, 174
  - 4.4.5 *Forma puntual de la ley de Ampere*, 178
- 4.5 Resumen 182
  - Preguntas de repaso 186
  - Problemas 187
  - Bibliografía 196

## 5 POTENCIAL

197

- 5.1 Conceptos generales 197
- 5.2 Potencial debido a una distribución dada de carga 200
- 5.3 Diferencia de potencial 207
- 5.4 Visualización de la función de potencial y el campo eléctrico 220
- 5.5 Ecuaciones de Laplace y de Poisson para el potencial 226
  - 5.5.1 *Unicidad de las soluciones a las ecuaciones de Poisson y de Laplace*, 230
  - 5.5.2 *Soluciones a la ecuación de Laplace con una sola variable*, 234
  - 5.5.3 *El método de separación de variables para soluciones a la ecuación de Laplace con más de una variable (coordenadas cartesianas)*, 242
  - 5.5.4 *Soluciones con el método de las imágenes*, 251
- 5.6 Potencial vectorial magnético 258
  - 5.6.1 *Potencial vectorial magnético producido por una distribución de corriente conocida*, 258
  - 5.6.2 *Ecuación vectorial de Poisson*, 264
- 5.7 Resumen 266
  - Preguntas de repaso 268
  - Problemas 269
  - Bibliografía 276

## **9 PROPAGACIÓN Y REFLEXIÓN DE ONDAS PLANAS** **475**

- 9.1 Conceptos generales 475
- 9.2 Ecuaciones de Maxwell 476
- 9.3 Ondas planas en el vacío o en dieléctricos no disipativos 477
- 9.4 Ondas planas en dieléctricos disipativos 481
- 9.5 Flujo de potencia: el vector de Poynting 486
- 9.6 Ondas planas en buenos conductores 490
- 9.7 Reflexión de ondas planas: incidencia normal 496
- 9.8 Onda plana con incidencia en dirección normal en la interfaz de dos dieléctricos 504
  - 9.8.1 *El problema de las dos interfaces, 511*
- 9.9 Una onda plana que incide en dirección normal sobre un buen conductor 513
- 9.10 Velocidad de onda, velocidad de grupo y velocidad de fase 516
- 9.11 Reflexión de ondas planas: incidencia oblicua 517
- 9.12 Reflexión de ondas desde reflectores en movimiento: efecto doppler 522
- 9.13 Resumen 524
  - Preguntas de repaso 525
  - Problemas 525

## **10 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN** **528**

- 10.1 Conceptos generales 528
- 10.2 Ecuaciones generales para el voltaje y la corriente en el dominio temporal 529
- 10.3 Regímenes transitorios en líneas de transmisión no disipadas con cargas resistivas 536
- 10.4 Ecuaciones generales del voltaje de una línea y del dominio de las frecuencias de corriente 544
- 10.5 Líneas de transmisión de potencia 549
- 10.6 Líneas sin distorsión 550

- 10.7 Efecto de penetración y aproximaciones para pérdidas alta y baja 552
- 10.8 Líneas no disipativas 554
  - 10.8.1 Impedancia de entrada y ondas estacionarias, 558
- 10.9 El transformador de un cuarto de longitud de onda  $\lambda/4$ , una sola sección y secciones múltiples 565
- 10.10 Flujo de potencia en líneas no disipativas 569
- 10.11 Diagrama de Smith 572
- 10.12 Igualación con un acoplador sencillo en paralelo 577
- 10.13 Igualación con un adaptador doble 580
- 10.14 La técnica de la línea ranurada 583
- 10.15 Análisis de una línea disipativa usando el diagrama de Smith 586
- 10.16 Resumen 590
  - Preguntas de repaso 591
  - Problemas 591

## 11 GUÍAS DE ONDAS

596

- 11.1 Conceptos generales 596
- 11.2 El modo ET de una guía de ondas en una línea de transmisión plana 597
- 11.3 Modos  $ET_{mn}$  en guías de ondas de forma rectangular 601
- 11.4 Modos  $MT_{mn}$  en guías de ondas rectangulares 611
- 11.5 Atenuación en guías de ondas de forma rectangular llenas de aire 615
- 11.6 Cavidades resonantes 618
- 11.7 Fibras ópticas (guías de luz) 623
  - 11.7.1 Enlaces de comunicación de fibra óptica, 625
  - 11.7.2 Detectores de fibras ópticas, 628
- 11.8 Resumen 629
  - Preguntas de repaso 629
  - Problemas 629

## 12 ANTENAS

633

- 12.1 Conceptos generales 633
- 12.2 El concepto de ganancia y abertura del haz 634

## **9 PROPAGACIÓN Y REFLEXIÓN DE ONDAS PLANAS** **475**

- 9.1 Conceptos generales 475
- 9.2 Ecuaciones de Maxwell 476
- 9.3 Ondas planas en el vacío o en dieléctricos no disipativos 477
- 9.4 Ondas planas en dieléctricos disipativos 481
- 9.5 Flujo de potencia: el vector de Poynting 486
- 9.6 Ondas planas en buenos conductores 490
- 9.7 Reflexión de ondas planas: incidencia normal 496
- 9.8 Onda plana con incidencia en dirección normal en la interfaz de dos dieléctricos 504
  - 9.8.1 *El problema de las dos interfaces, 511*
- 9.9 Una onda plana que incide en dirección normal sobre un buen conductor 513
- 9.10 Velocidad de onda, velocidad de grupo y velocidad de fase 516
- 9.11 Reflexión de ondas planas: incidencia oblicua 517
- 9.12 Reflexión de ondas desde reflectores en movimiento: efecto doppler 522
- 9.13 Resumen 524
  - Preguntas de repaso 525
  - Problemas 525

## **10 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN** **528**

- 10.1 Conceptos generales 528
- 10.2 Ecuaciones generales para el voltaje y la corriente en el dominio temporal 529
- 10.3 Regímenes transitorios en líneas de transmisión no disipadas con cargas resistivas 536
- 10.4 Ecuaciones generales del voltaje de una línea y del dominio de las frecuencias de corriente 544
- 10.5 Líneas de transmisión de potencia 549
- 10.6 Líneas sin distorsión 550

- 10.7 Efecto de penetración y aproximaciones para pérdidas alta y baja 552
- 10.8 Líneas no disipativas 554
  - 10.8.1 Impedancia de entrada y ondas estacionarias, 558
- 10.9 El transformador de un cuarto de longitud de onda  $\lambda/4$ , una sola sección y secciones múltiples 565
- 10.10 Flujo de potencia en líneas no disipativas 569
- 10.11 Diagrama de Smith 572
- 10.12 Igualación con un acoplador sencillo en paralelo 577
- 10.13 Igualación con un adaptador doble 580
- 10.14 La técnica de la línea ranurada 583
- 10.15 Análisis de una línea disipativa usando el diagrama de Smith 586
- 10.16 Resumen 590
  - Preguntas de repaso 591
  - Problemas 591

## 11 GUÍAS DE ONDAS

596

- 11.1 Conceptos generales 596
- 11.2 El modo ET de una guía de ondas en una línea de transmisión plana 597
- 11.3 Modos  $ET_{mn}$  en guías de ondas de forma rectangular 601
- 11.4 Modos  $MT_{mn}$  en guías de ondas rectangulares 611
- 11.5 Atenuación en guías de ondas de forma rectangular llenas de aire 615
- 11.6 Cavidades resonantes 618
- 11.7 Fibras ópticas (guías de luz) 623
  - 11.7.1 Enlaces de comunicación de fibra óptica, 625
  - 11.7.2 Detectores de fibras ópticas, 628
- 11.8 Resumen 629
  - Preguntas de repaso 629
  - Problemas 629

## 12 ANTENAS

633

- 12.1 Conceptos generales 633
- 12.2 El concepto de ganancia y abertura del haz 634

12.3	El dipolo elemental	636
12.4	El dipolo de media onda	642
12.5	Arreglo lineal de antenas equidistantes	646
12.6	Antenas de abertura	656
12.7	La ecuación de Friis: aplicaciones	665
12.8	La ecuación del radar	668
12.9	Resumen	672
	Preguntas de repaso	672
	Problemas	672
<b>APÉNDICE A FÓRMULA DE LA DIVERGENCIA A PARTIR DEL USO DE UN VOLUMEN TETRAÉDRICO</b>		
		<b>676</b>
<b>APÉNDICE B FÓRMULA DEL ROTACIONAL A PARTIR DEL USO DE UNA SUPERFICIE TRIANGULAR</b>		
		<b>682</b>
<b>APÉNDICE C LEY CIRCUITAL DE AMPERE</b>		
		<b>687</b>
<b>APÉNDICE D LA PROPIEDAD DE PROMEDIACIÓN RELACIONADA CON LAS SOLUCIONES DE LA ECUACIÓN DE LAPLACE</b>		
		<b>694</b>
<b>APÉNDICE E EL TEOREMA DE HELMHOLTZ</b>		
		<b>697</b>
<b>APÉNDICE F SEPARACIÓN DE VARIABLES EN COORDENADAS CILÍNDRICAS</b>		
		<b>700</b>
<b>APÉNDICE G CAPACITANCIA Y CONDUCTANCIA MUTUAS</b>		
		<b>709</b>
G.1	Capacitancia mutua	709
G.2	Conductancia mutua	716
<b>APÉNDICE H BANDAS DE FRECUENCIAS</b>		
		<b>722</b>
<b>APÉNDICE I SÍMBOLOS USADOS EN ESTE TEXTO</b>		
		<b>723</b>
<b>REFERENCIAS QUE SE SUGIEREN PARA LECTURAS POSTERIORES</b>		
		<b>726</b>
<b>SOLUCIONES DE LOS PROBLEMAS AL FINAL DE CADA SECCIÓN</b>		
		<b>728</b>
<b>ÍNDICE</b>		
		<b>731</b>