

contenido

* Capítulo 1-Repaso del análisis de vectores	1
1.1 SISTEMAS COORDENADOS	2
1-1-1 Coordenadas rectangulares (cartesianas)	2
1-1-2 Coordenadas cilíndricas circulares	4
1-1-3 Coordenadas esféricas	4
1-2 ALGEBRA VECTORIAL	7
1-2-1 Escalares y vectores	7
1-2-2 Multiplicación de un vector por escalar	8
1-2-3 Adición y sustracción	9
1-2-4 El producto escalar	11
1-2-5 El producto vectorial	13
1-3 EL GRADIENTE Y EL OPERADOR DEL	16
1-3-1 El gradiente	16
1-3-2 Coordenadas curvilíneas	17
(a) Cilíndricas	17
(b) Esféricas	17
1-3-3 La integral de línea	18
1-4 FLUJO Y DIVERGENCIA	21
1-4-1 Flujo	22
1-4-2 Divergencia	23
1-4-3 Coordenadas curvilíneas	24
(a) Coordenadas cilíndricas	24
(b) Coordenadas esféricas	26
1-4-4 El teorema de la divergencia	26
1-5 EL ROTACIONAL Y EL TEOREMA DE STOKES	28
1-5-1 El rotacional	28
1-5-2 El rotacional para coordenadas curvilíneas	31
(a) Coordenadas cilíndricas	31
(b) Coordenadas esféricas	33
1-5-3 Teorema de Stokes	35
1-5-4 Algunas identidades vectoriales útiles	38
(a) El rotacional del gradiente es cero	38
(b) La divergencia del rotacional de un vector es cero ad.	39
PROBLEMAS	39
Capítulo 2-El campo eléctrico	49
2-1 CARGA ELECTRICA	50

	2-1-1 Carga por contacto	50
	2-1-2 Inducción electrostática	52
	2-1-3 El experimento de la "cubeta de hielo" de Faraday	53
2-2	LA LEY DE FUERZAS DE COULOMB ENTRE CARGAS ESTACIONARIAS	54
	2-2-1 Ley de Coulomb	54
	2-2-2 Unidades	55
	2-2-3 El campo eléctrico	56
	2-2-4 Superposición	57
2-3	DISTRIBUCIONES DE CARGA	59
	2-3-1 Distribuciones de carga lineal, superficial y volumétrica	60
	2-3-2 El campo eléctrico debido a una distribución de carga	63
	2-3-3 Campo debido a una línea de carga de longitud infinita	64
	2-3-4 Campo debido a láminas infinitas con carga superficial	65
	(a) Una lámina simple	65
	(b) Láminas paralelas de signo opuesto	67
	2-3-5 Superposición de espiras de carga lineal	69
	(a) Espira simple	69
	(b) Discos de carga superficial	69
	(c) Cilindro hueco con carga superficial	71
	(d) Cilindro con carga volumétrica	72
72	2-4 LEY DE GAUSS	72
	2-4-1 Propiedades del vector desplazamiento entre dos puntos r_{QP}	72
	(a) r_{QP}	72
	(b) Gradiente de la recíproca de la distancia $\nabla(1/r_{QP})$	73
	(c) Laplaciano de la recíproca de la distancia	73
	2-4-2 Ley de Gauss en forma integral	74
	(a) Carga puntual dentro o fuera de un volumen cerrado	74
	(b) Distribución de carga	75
	2-4-3 Simetría esférica	76
	(a) Carga superficial	76
	(b) Distribución volumétrica de carga	79
	2-4-4 Simetría cilíndrica	80
	(a) Cilindro hueco con carga superficial	80
	(b) Cilindro con carga volumétrica	82
	2-4-5 La ley de Gauss y el teorema de la divergencia	82
	2-4-6 Discontinuidad del campo eléctrico a través de una lámina de carga superficial	83
2-5	EL POTENCIAL ELECTRICICO	84
	2-5-1 Trabajo requerido para mover una carga puntual	85

2-5-3	El potencial y el campo eléctrico	86
2-5-4	Línea de carga de longitud finita	88
2-5-5	Esferas cargadas	90
	(a) Carga superficial	90
	(b) Carga volumétrica	91
	(c) Dos esferas	92
2-5-6	Ecuaciones de Poisson y Laplace	93
2-6	MÉTODOS DE LAS IMAGENES CON LINEAS DE CARGA Y CILINDROS	93
2-6-1	Dos líneas de carga paralelas	93
2-6-2	El método de las imágenes	96
	(a) Propiedades generales	96
	(b) Línea de carga cerca de un plano conductor	96
2-6-3	Línea de carga y cilindro	97
2-6-4	Línea bifilar	99
	(a) Cargas imagen	99
	(b) Fuerzas de atracción	100
	(c) Capacitancia por unidad de longitud	101
2-7	EL MÉTODO DE LAS IMAGENES CON CARGAS PUNTIFORMES Y ESFERAS	103
2-7-1	Carga puntual y esfera conectada a tierra	103
2-7-2	Carga puntiforme próxima a un plano a tierra	106
2-7-3	Esfera con carga constante	109
2-7-4	Esfera con voltaje constante	110
PROBLEMAS		110
Capítulo 3-Polarización y conducción		135
3-1	POLARIZACION	136
3-1-1	El dipolo eléctrico	137
3-1-2	Carga de polarización	140
3-1-3	El campo de desplazamiento	143
3-1-4	Dieléctricos lineales	143
	(a) Polarizabilidad	143
	(b) El campo eléctrico local	145
3-1-5	Polarización espontánea	149
	(a) Ferroeléctricos	149
	(b) Electretos	151
3-2	CONDUCCION	152
3-2-1	Conservación de la carga	152
3-2-2	Modelos de conducción en gases cargados	154
	(a) Ecuaciones	154
	(b) Conducción arrastre-difusión	156
	(c) Ley de Ohm	159
	(d) Superconductores	160
3-3	CONDICIONES DE FRONTERA DEL CAMPO	161
3-3-1	Componente tangencial de E	162
3-3-2	Componente normal de D	163

3-3-3	Carga puntual arriba de una frontera dieléctrica	164
3-3-4	Componente normal P y E	165
3-3-5	Componente normal de J	168
3-4	RESISTENCIA	169
3-4-1	Resistencia entre dos electrodos	169
3-4-2	Resistor de placas paralelas	170
3-4-3	Resistor coaxial	172
3-4-4	Resistor esférico	173
3-5	CAPACITANCIA	173
3-5-1	Electrodos de placas paralelas	173
3-5-2	Capacitancia para cualquier geometría	177
3-5-3	Flujo de corriente a través de un capacitor	178
3-5-4	Capacitancia de dos esferas en contacto	178
3-6	MEDIOS CON PERDIDAS	181
3-6-1	Relajación transitoria de la carga	182
3-6-2	Esfera cargada uniformemente	183
3-6-3	Capacitor disipativo en serie	184
	(a) Carga transitoria	184
	(b) Circuito abierto	187
	(c) Corto circuito	188
	(d) Estado estacionario senoidal	188
3-6-4	Sistemas distribuidos	189
	(a) Ecuaciones	189
	(b) Estado estacionario	191
	(c) Solución transitoria	192
3-6-5	Efectos de convección	194
3-6-6	La Tierra y su atmósfera como un capacitor esférico con pérdidas	195
3-7	DISTRIBUCIONES DE CARGA ESPECIAL DEPENDIENTES DEL CAMPO	197
3-7-1	Tubo diodo, carga espacial limitada	198
3-7-2	Conducción limitada de carga espacial en dieléctricos	201
3-8	ENERGÍA ALMACENADA EN UN MEDIO DIELECTRICO	204
3-8-1	Trabajo necesario para establecer una distribución de cargas puntuales	204
	(a) Reunión de las cargas	204
	(b) Energía de ligadura de un cristal	205
3-8-2	Trabajo necesario para formar una distribución continua de carga	206
3-8-3	Densidad de energía del campo eléctrico	208
3-8-4	Energía almacenada en esferas cargadas	210
	(a) Volumen cargado	210
	(b) Superficie cargada	210
	(c) Energía de ligadura de un átomo	211
3-8-5	Energía almacenada en un capacitor	212
3-9	CAMPOS Y SUS FUERZAS	213
3-9-1	Fuerza por unidad de área sobre una lámina con carga superficial	213

3-9-2 Fuerzas sobre un medio polarizado 215
 (a) Densidad de fuerza 215
 (b) Medio permanente polarizado 216
 (c) Medio polarizado linealmente 218
 3-9-3 Fuerzas sobre un capacitor 219
 3-10 GENERADORES ELECTROSTATICOS ... 223
 3-10-1 Generador Van de Graaff 223
 3-10-2 Máquinas de inducción electrostática autoexcitadas 224
 3-10-3 Voltajes alternos trifásicos autoexcitados 227
 3-10-4 Generadores de multifrecuencia autoexcitados 229
PROBLEMAS 231

Capítulo 4-Problemas de valores en la frontera del campo eléctrico 257

4-1 TEOREMA DE UNICIDAD 258
 4-2 PROBLEMAS DE VALOR A LA FRONTERA EN GEOMETRIAS CARTESIANAS 259
 4-2-1 Separación de variables 260
 4-2-2 Solución con constantes de separación de cero 261
 (a) Electrodo hiperbólicos 261
 (b) Resistor en una caja abierta 262
 4-2-3 Soluciones de constantes de separación diferente de cero 264
 4-2-4 Excitación periódica espacial 265
 4-2-5 Armónicas rectangulares 267
 4-2-6 Soluciones tridimensionales 270
 4-3 SEPARACION DE VARIABLES EN GEOMETRIA CILINDRICA 271
 4-3-1 Soluciones polares 271
 4-3-2 Cilindro en un campo eléctrico uniforme 273
 (a) Solución del campo 273
 (b) Representación de las líneas de fuerza 276
 4-3-3 Soluciones tridimensionales 277
 4-3-4 Boquilla aisladora de alto voltaje 282
 4-4 SOLUCIONES PRODUCTO EN GEOMETRIA ESFERICA 284
 4-4-1 Soluciones en una dimensión 284
 4-4-2 Soluciones axisimétricas 286
 4-4-3 Esfera conductora en un campo uniforme 287
 (a) Solución de campo 288
 (b) Representación gráfica de las líneas de fuerza 290
 4-4-4 Precipitación de partículas cargadas sobre una esfera 293
 4-5 UN METODO NUMERICO-RELAJACION SUCESIVA 297

4-5-1	Desarrollos en diferencias finitas	297
4-5-2	Potencial dentro de una caja cuadrada	298
PROBLEMAS		301
Capítulo 5-El campo magnético		313
5-1	FUERZAS SOBRE CARGAS EN MOVIMIENTO	314
5-1-1	La ley de fuerza de Lorentz	314
5-1-2	Cargas en movimiento en un campo magnético uniforme	316
5-1-3	El espectrógrafo de masas	318
5-1-4	El ciclotrón	319
5-1-5	Efecto de Hall	321
5-2	CAMPO MAGNETICO DEBIDO A CORRIENTES	322
5-2-1	La ley de Biot-Savart	322
5-2-2	Corrientes lineales	324
5-2-3	Láminas de corriente	325
	(a) Lámina simple de corriente superficial	325
	(b) Placa de corriente volumétrica	327
	(c) Dos láminas de corriente paralelas	328
5-2-4	Arcos de corriente lineal	329
	(a) Arco simple	329
	(b) Arcos (bobina de Helmholtz)	331
	(c) Cilindro hueco de corriente superficial	331
5-3	DIVERGENCIA Y ROTACIONAL DEL CAMPO MAGNETICO	332
5-3-1	Ley de Gauss para el campo magnético	332
5-3-2	Ley circuital de Ampere	333
5-3-3	Corrientes con simetría cilíndrica	335
	(a) Corriente superficial	336
	(b) Corriente volumétrica	336
5-4	EL POTENCIAL VECTORIAL	336
5-4-1	Unidad	336
5-4-2	El potencial vectorial de una distribución de corriente	338
5-4-3	El potencial vectorial y el flujo magnético	338
	(a) Línea de corriente de longitud finita	338
	(b) Corriente superficial de anchura finita	341
	(c) Flujo a través de una espira cuadrada	342
5-5	MAGNETIZACION	343
5-5-1	El dipolo magnético	344
5-5-2	Corriente de magnetización	346
5-5-3	Materiales magnéticos	349 ✓
	(a) Diamagnetismo	349 ✓
	(b) Paramagnetismo	352 ✓
	(c) Ferromagnetismo	356 ✓

5-6	CONDICIONES EN LA FRONTERA	359
5-6-1	Componente tangencial de H	359
5-6-2	Componente tangencial de M	360
5-6-3	Componente normal de B	360
5-7	PROBLEMAS DE VALOR EN LA FRONTERA DEL CAMPO MAGNETICO ..	361
5-7-1	Método de imágenes	361
5-7-2	Esfera en un campo magnético uniforme	364
5-8	CAMPOS MAGNETICOS Y FUERZAS	368
5-8-1	Medios magnetizables	368
5-8-2	Fuerzas sobre una espira de corriente	370
	(a) Únicamente fuerza de Lorentz	370
	(b) Únicamente fuerza de magnetización	370
	(c) Fuerzas de Lorentz y de magnetización	374
PROBLEMAS	375
Capítulo 6-Inducción electromagnética	394
6-1	LEY DE FARADAY DE LA INDUCCION ..	394
6-1-1	La fuerza electromotriz (FEM)	394
6-1-2	Ley de Lenz	395
	(a) Espira cortocircuitada	397
	(b) Espira en circuito abierto .	399
	(c) Fuerza de reacción	400
6-1-3	Laminaciones	401
6-1-4	El betatrón	403
6-1-5	Ley de Faraday y teorema de Stokes ...	404
6-2	CIRCUITOS MAGNETICOS	405
6-2-1	Autoinductancia	405
6-2-2	Reluctancia	409
	(a) Reluctancias en serie	410
	(b) Reluctancias en paralelo	411
6-2-3	Acción de transformador	411
	(a) Acción de transformador	411
	(b) El transformador ideal	413
	(c) El transformador real	416
6-3	LA LEY DE FARADAY PARA MEDIOS MOVILES	417
6-3-1	La transformación del campo eléctrico .	417
6-3-2	Ley de Ohm para conductores en movi- miento	417
6-3-3	Disco de Faraday (generador homopo- lar)	420
	(a) Campo magnético aplicado	420
	(b) Generador autoexcitado	422
	(c) Operación de ca autoexcitada	424
	(d) Inversiones periódicas de la velocidad del motor	426
6-3-4	Motores y generadores básicos	427
	(a) Máquina de ca	427
	(b) Máquina de cd	428

6-3-5 Máquinas MHD	430
6-3-6 Paradojas	430
(a) Una máquina de cd sin conmutadores	431
(b) Cambios en el flujo magnético debidos a conmutación	433
(c) Número de vueltas de una bobina que varía con el tiempo	433
6-4 DIFUSION MAGNETICA EN UN CONDUCTOR OHMICO	435
6-4-1 Modelo resistor-inductor	435
6-4-2 La ecuación de difusión magnética	437
6-4-3 Solución transitoria sin movimiento (U = 0)	438
6-4-4 El estado estacionario senoidal (espesor de la película)	442
6-4-5 Efectos de convección	444
6-4-6 Una máquina de inducción lineal	446
6-4-7 Superconductores	450
6-5 ENERGÍA ALMACENADA EN EL CAMPO MAGNETICO	451
6-5-1 Una sola espira de corriente	451
(a) Trabajo eléctrico	452
(b) Trabajo mecánico	453
6-5-2 Energía e inductancia	454
6-5-3 Distribuciones de corriente	454
6-5-4 Densidad de energía magnética	455
6-5-5 El cable coaxial	456
(a) Inductancia externa	456
(b) Inductancia interna	457
6-5-6 Autoinductancia, capacitancia y resistencia	458
6-6 EL METODO DE LA ENERGIA PARA FUERZAS	460
6-6-1 El principio del trabajo virtual	460
6-6-2 Punto de vista circuital	461
6-6-3 Fuerzas de magnetización	464
PROBLEMAS	465
Capítulo 7-Electrodinámica: campos y ondas	487
7-1 ECUACIONES DE MAXWELL	488
7-1-1 Corriente de desplazamiento, corrección a la Ley de Ampere	488
7-1-2 Teoría del circuito como una aproximación cuasiestática	490
7-2 CONSERVACION DE LA ENERGIA	490
7-2-1 Teorema de Pointing	490
7-2-2 Un capacitor con pérdida	491
7-2-3 Potencia en circuitos eléctricos	493
7-2-4 El teorema complejo de Pointing	494

7-3 ONDAS ELECTROMAGNETICAS	
TRANSVERSALES	496
7-3-1 Ondas planas	496
7-3-2 La ecuación de onda	497
(a) Soluciones	497
(b) Propiedades	499
7-3-3 Fuentes de ondas planas	500
7-3-4 Una breve introducción a la teoría de la relatividad	503
7-4 VARIACIONES SENOIDALES CON	
EL TIEMPO	505
7-4-1 Frecuencia y número de onda	505
7-4-2 Corrimiento de frecuencia por efecto Doppler	507
7-4-3 Pérdidas óhmicas	508
(a) Límite de pérdidas bajas	509
(b) Límite de pérdidas altas	511
7-4-4 Propagación de ondas de alta frecuencia	511
7-4-5 Medios dispersivos	512
7-4-6 Polarización	514
(a) Polarización lineal	515
(b) Polarización circular	515
7-4-7 Propagación de ondas en medios anisótropos	516
(a) Polarizadores	517
(b) Doble refracción (birrefringencia) ..	518
7-5 INCIDENCIA NORMAL SOBRE UN	
CONDUCTO PERFECTO	520
7-6 INCIDENCIA NORMAL SOBRE UN	
DIELECTRICO	522
7-6-1 Dieléctrico sin pérdidas	522
7-6-2 Flujo de potencia de tiempo-promedio .	524
7-6-3 Dieléctrico con pérdidas	525
(a) Pérdidas bajas	525
(b) Pérdidas altas	525
7-7 ONDAS PLANAS UNIFORMES Y NO	
UNIFORMES	529
7-7-1 Propagación a un ángulo cualquiera ...	529
7-7-2 La constante de propagación compleja .	530
7-7-3 Ondas planas no uniformes	532
7-8 INCIDENCIA OBLICUA SOBRE UN	
CONDUCTOR PERFECTO	534
7-8-1 Campo E paralelo a la entrecara	534
7-8-2 Campo H paralelo a la entrecara	536
7-7 INCIDENCIA OBLICUA SOBRE UN	
DIELECTRICO	538
7-9-1 E paralelo a la entrecara	538
7-9-2 Angulo de Brewster de no reflexión ...	540
7-9-3 Angulo crítico de transmisión	541
7-9-4 Campo H paralelo a la frontera	542

7-10 APLICACIONES A LA OPTICA	544
7-10-1 Reflexiones desde un espejo	545
7-10-2 Desplazamiento lateral de un rayo lumi- noso	545
7-10-3 Polarización por reflexión	546
7-10-4 Propagación de la luz en el agua	548
(a) Fuente sumergida	548
(b) Pez debajo de un bote	548
7-10-5 Prismas totalmente reflectantes	549
7-10-6 Fibróptica	550
(a) Tubo ligero recto	55P
(b) Fibras flexionadas	551
PROBLEMAS	552
Capítulo 8-Ondas electromagnéticas dirigidas	567
8-1 LAS ECUACIONES DE LA LINEA DE TRANSMISION	568
8-1-1 Línea de transmisión de placas paralelas	568
8-1-2 Estructura general de la línea de transmi- sión	570
8-1-3 Representación del circuito distribuido	575
8-1-4 Flujo de potencia	576
8-1-5 La ecuación de onda	578
8-2 ONDAS TRANSITORIAS EN LAS LINEAS DE TRANSMISION	579
8-2-1 Transitorio sobre líneas de transmisión infinitamente largas	579
8-2-2 Reflexiones de terminaciones resistivas	581
(a) Coeficiente de reflexión	581
(b) Voltaje en escalón	582
8-2-3 Enfoque al estado estacionario de cd	585
8-2-4 Inductores y capacitores como aproxima- ciones cuasiestáticas a las líneas de trans- misión	589
8-2-5 Reflexiones de terminaciones arbitrarias	592
8-3 VARIACIONES SENOIDALES CON EL TIEMPO	595
8-3-1 Soluciones de las ecuaciones de la línea de transmisión	595
8-3-2 Terminaciones sin pérdidas	596
(a) Línea cortocircuitada	596
(b) Línea en circuito abierto	599
8-3-3 Elementos de circuito reactivo como apro- ximaciones a líneas de transmisión cortas	601
8-3-4 Efectos de líneas con pérdidas	602
(a) Aproximación a circuito distribuido	602
(b) Líneas sin distorsión	603
(c) Aproximación de campos	604
8-4 TERMINACIONES DE IMPEDANCIA ARBITRARIA	607

8-4-1	El coeficiente de reflexión	607
8-4-2	Ejemplos sencillos	608
	(a) Impedancia de carga reflejada hacia la fuente	608
	(b) Equilibrio por cuarto de longitud de onda	610
8-4-3	El diagrama de Smith	611
8-4-4	Números de ondas estacionarias	616
8-5	ADAPTADOR DE SINTONIA	620
8-5-1	Uso del diagrama de Smith para cálculo de admitancias	620
8-5-2	Adaptador simple	623
8-5-3	Adaptador doble	625
8-6	GUIA DE ONDAS RECTANGULAR	629
8-6-1	Ecuaciones	630
8-6-2	Modos magnéticos transversales (MT) ..	631
8-6-3	Modos eléctricos transversales (ET)	635
8-6-4	Corte	638
8-6-5	Flujo de potencia en guías de ondas ...	651
	(a) Flujo de potencia en guías de ondas ..	641
	(b) Flujo de potencia para los modos ET ..	642
8-6-6	Pérdidas en las paredes	643
8-7	GUIA DE ONDAS DIELECTRICO	644
8-7-1	Soluciones MT	644
	(a) Soluciones impares	645
	(b) Soluciones pares	647
8-7-2	Soluciones ET	647
	(a) Soluciones impares	647
	(b) Soluciones pares	648
PROBLEMAS	649
Capítulo 9-Radiación	663
9-1	POTENCIALES RETARDADOS	664
9-1-1	Ecuaciones de onda no homogéneas ...	644
9-1-2	Soluciones de la ecuación de onda	666
9-2	RADIACION DE DIPOLOS PUNTUALES ..	667
9-2-1	El dipolo eléctrico	667
9-2-2	Empleo del potencial escalar	669
9-2-3	Los campos eléctricos y magnéticos	670
9-2-4	Líneas del campo eléctrico	671
9-2-5	Resistencia de radiación	674
9-2-6	Dispersión de Rayleigh (o, ¿por qué el cielo es azul?	677
9-2-7	Radiación de un dipolo magnético puntual	679
9-3	SISTEMAS DIPOLARES PUNTUALES	681
9-3-1	Sistema simple de dos elementos	681
	(a) Sistema de radiación transversal	683
	(b) Sistema de radiación longitudinal ..	685
	(c) Fase arbitraria de la corriente	685
9-3-2	Un sistema de N dipolos	685

9-4 ANTENAS DIPOLARES LARGAS	687
9-4-1 Solución de campo lejano	688
9-4-2 Corriente uniforme	690
9-4-3 Resistencia de radiación	691
PROBLEMAS	695
Indice alfabético	711

100 ...
 101 ...
 102 ...
 103 ...
 104 ...
 105 ...
 106 ...
 107 ...
 108 ...
 109 ...
 110 ...
 111 ...
 112 ...
 113 ...
 114 ...
 115 ...
 116 ...
 117 ...
 118 ...
 119 ...
 120 ...
 121 ...
 122 ...
 123 ...
 124 ...
 125 ...
 126 ...
 127 ...
 128 ...
 129 ...
 130 ...
 131 ...
 132 ...
 133 ...
 134 ...
 135 ...
 136 ...
 137 ...
 138 ...
 139 ...
 140 ...
 141 ...
 142 ...
 143 ...
 144 ...
 145 ...
 146 ...
 147 ...
 148 ...
 149 ...
 150 ...
 151 ...
 152 ...
 153 ...
 154 ...
 155 ...
 156 ...
 157 ...
 158 ...
 159 ...
 160 ...
 161 ...
 162 ...
 163 ...
 164 ...
 165 ...
 166 ...
 167 ...
 168 ...
 169 ...
 170 ...
 171 ...
 172 ...
 173 ...
 174 ...
 175 ...
 176 ...
 177 ...
 178 ...
 179 ...
 180 ...
 181 ...
 182 ...
 183 ...
 184 ...
 185 ...
 186 ...
 187 ...
 188 ...
 189 ...
 190 ...
 191 ...
 192 ...
 193 ...
 194 ...
 195 ...
 196 ...
 197 ...
 198 ...
 199 ...
 200 ...