

ÍNDICE ANALÍTICO

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ÁLGEBRA MATRICIAL ELEMENTAL	2
Operaciones fundamentales	4
Tipos de matrices	9
Determinantes	11
Inversa de una matriz	14
Método del pivote o de Gauss	16
Ecuaciones lineales	19
Solución general de $y = Ax$	23
Ecuación característica	25
Semejanza	26
Inecuación de Sylvester	29
Norma de un vector	29
1.3 NOTACIÓN Y REFERENCIAS	33
1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES	35
Linealidad	35
Invariancia en el tiempo	35
Pasividad	36
Reciprocidad	37

x	ÍNDICE ANALÍTICO	
1.5	COMPONENTES DE LAS REDES	37
	Transformador	40
	Girador	43
	Generadores independientes	45
	Generadores gobernados o dependientes	46
	Convertidor negativo	48
	PROBLEMAS	49
	2. TEORÍA DE LOS GRAFOS Y ECUACIONES DE LA RED	57
2.1	INTRODUCCIÓN	57
	Leyes de Kirchhoff	57
	Ecuaciones de los bucles	59
	Ecuaciones de los nudos	61
	Ecuaciones de estado—Sistema mixto	62
	Soluciones de las ecuaciones	65
2.2	GRAFOS LINEALES	68
	Definiciones introductorias	68
	Matriz de incidencia	71
	Matriz de los bucles	75
	Relaciones entre submatrices de A y B	79
	Cortes y matriz de un corte	81
	Grafos planos	85
2.3	LEYES FUNDAMENTALES DE LAS REDES ELÉCTRICAS	87
	Primera ley de Kirchhoff	87
	Segunda ley de Kirchhoff	92
	Relaciones en los arcos	96
2.4	ECUACIONES DE BUCLE, NUDO Y PAR DE NUDOS	100
	Ecuaciones de bucle	101
	Ecuaciones de nudo	106
	Ecuaciones de par de nudos	111
2.5	DUALIDAD	114

2.6 REDES NO RECÍPROCAS Y ACTIVAS	118
2.7 ECUACIONES CON VARIABLES MEZCLADAS	127
PROBLEMAS	135
3. FUNCIONES DE RED	145
3.1 FUNCIONES DE ENTRADA Y DE TRANSFERENCIA	145
Funciones de entrada	148
Funciones de transferencia	151
3.2 REDES MULTITERMINALES	152
3.3 REDES DE DOS PUERTAS	154
Parámetros en circuito abierto y en cortocircuito	155
Parámetros híbridos	157
Parámetros de cadena	159
Ceros de transmisión	161
3.4 INTERCONEXIÓN DE REDES BIPUERTA	163
Conexión en cascada	163
Conexiones en paralelo y en serie	165
Permisibilidad de interconexión	168
3.5 REDES MULTIPUERTA	169
3.6 MATRIZ ADMITANCIA INDEFINIDA	172
Unión de dos terminales	176
Supresión de terminales	177
Redes en paralelo	177
Adjuntos del determinante de Y_i	178
3.7 MATRIZ DE IMPEDANCIA INDEFINIDA	181
3.8 FÓRMULAS TOPOLÓGICAS PARA LAS FUNCIONES DE RED	185
Determinante de la matriz de admitancias de nudo	185
Adjuntos simétricos de la matriz de admitancias de nudo	187
Adjuntos asimétricos de la matriz de admitancias de nudo	191

xii	ÍNDICE ANALÍTICO	
	Matriz de impedancias de bucle y sus adjuntos	193
	Parámetros de bipuerta	197
	PROBLEMAS	201
	4. ECUACIONES DE ESTADO	223
4.1	ORDEN DE COMPLEJIDAD DE UNA RED	224
4.2	CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES PARA ESCRIBIR LAS ECUACIONES DE ESTADO	228
4.3	SOLUCIONES DE LAS ECUACIONES DE ESTADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	238
	Solución de la ecuación homogénea	241
	Otro método de solución	243
	Exponencial matricial	250
4.4	FUNCIONES DE UNA MATRIZ	252
	El teorema de Cayley-Hamilton y sus consecuencias	253
	Valores propios distintos	255
	Valores propios múltiples	258
	Matrices constituyentes	261
	Matriz resolvente	262
	Algoritmo de la matriz resolvente	264
	Polinomios resolventes	268
4.5	FORMULACIÓN SISTEMÁTICA DE LAS ECUACIONES DE ESTADO	272
	Consideraciones topológicas	274
	Eliminación de las variables que no interesan	277
	Redes invariantes en el tiempo	282
	Redes RLC	283
	Matrices de los parámetros para redes RLC	285
	Consideraciones para el manejo de generadores gobernados	293
4.6	FORMULACIÓN MULTIPUERTA DE LAS ECUACIONES DE ESTADO	297
	Ecuaciones de salida	304
	PROBLEMAS	310

5. SOLUCIONES INTEGRALES	327
5.1 TEOREMA DE LA CONVOLUCIÓN	328
5.2 RESPUESTA AL IMPULSO	332
Función transferencia no nula en el infinito	337
Otra deducción de la integral de convolución	337
5.3 RESPUESTA AL ESCALÓN	341
5.4 PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN	347
La superposición en función de impulsos	347
La superposición en función de escalones	350
5.5 SOLUCIONES NUMÉRICAS	352
Redes de varias entradas y salidas	355
Respuesta del estado	357
Propagación de errores	360
5.6 CÁLCULO NUMÉRICO DE e^{sT}	362
Cálculo de errores	366
Errores de la respuesta del estado libre	366
Errores de la respuesta del estado gobernado	368
PROBLEMAS	371
6. REPRESENTACIONES DE LAS FUNCIONES DE RED	381
6.1 POLOS, CEROS Y FRECUENCIAS PROPIAS	381
Situaciones de los polos	383
Partes par e impar de una función	385
Módulo y argumento de una función	387
Función retardo	388
6.2 FUNCIONES DE FASE MÍNIMA	388
Funciones pasa-todo y de fase mínima	390
Variación total de argumento	392
Polinomios de Hurwitz	393

xiv	ÍNDICE ANALÍTICO	
6.3	REDES DE FASE MÍNIMA Y DE FASE NO MÍNIMA	394
	Redes escalera	394
	Redes de resistencia constante	396
6.4	DETERMINACIÓN DE UNA FUNCIÓN DE RED A PARTIR DE SU MÓDULO	402
	Respuesta de máximo aplanamiento	404
	Respuesta de Chebychef	409
6.5	CÁLCULO DE UNA FUNCIÓN DE RED A PARTIR DE UN ARGUMENTO DADO	411
6.6	CÁLCULO DE UNA FUNCIÓN DE RED A PARTIR DE UNA PARTE REAL DADA	415
	Método de Bode	416
	Método de Gewertz	417
	Método de Miyata	418
6.7	RELACIONES INTEGRALES ENTRE LAS PARTES REAL E IMAGINARIA	420
	Teoremas de la integral de la reactancia y de la integral de la resistencia	426
	Limitaciones impuestas a las redes restringidas	428
	Otra forma de las relaciones	430
	Relaciones obtenidas con diferentes funciones ponderantes	433
6.8	RELACIONES DE LAS RESPUESTAS A LA FRECUENCIA Y AL TIEMPO	437
	Respuesta al escalón	437
	Respuesta al impulso	441
PROBLEMAS		444
7. FUNDAMENTOS DE LA SÍNTESIS DE REDES		453
7.1	TRANSFORMACIONES DE MATRICES	454
	Transformaciones elementales	454
	Matrices equivalentes	456
	Transformación de semejanza	457
	Transformación congruente	458
7.2	FORMAS CUADRÁTICA Y HERMÍTICA	459
	Definiciones	460

Transformación de una forma cuadrática	462
Formas definida y semidefinida	463
Formas hermíticas	466
7.3 FUNCIONES ENERGÉTICAS	466
Redes recíprocas pasivas	469
Función impedancia	473
Condición impuesta al argumento	474
7.4 FUNCIONES REALES POSITIVAS	477
Condiciones necesarias y suficientes	481
Propiedad del argumento de las funciones reales positivas	484
Funciones reales acotadas	484
Función parte real	486
7.5 FUNCIONES REACTANCIA	488
Realización de funciones reactancia	492
Forma en escalera de una red	495
Los polinomios de Hurwitz y las funciones reactancia	498
7.6 IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS DE REDES RC	500
Realizaciones de redes escalera	506
Redes resistencia-inductancia	507
7.7 PARÁMETROS DE BIPUERTAS	507
Bipuertas resistencia-capacidad	511
7.8 BIPUERTA SIN PÉRDIDAS TERMINADA EN UNA RESISTENCIA	513
7.9 BIPUERTAS RC PASIVAS Y ACTIVAS	522
Conexión en cascada	523
Convertidor negativo en cascada	525
Conexión en paralelo	527
Configuración del amplificador RC	530
PROBLEMAS	534
8. PARÁMETROS DE DISPERSIÓN	553

xvi **ÍNDICE ANALÍTICO**

8.1	RELACIONES DE DISPERSIÓN DE UNA MONOPUERTA	554
	Variables normalizadas—Normalización real	556
	Red aumentada	558
	Coefficiente de reflexión para una red recíproca pasiva e invariante en el tiempo	560
	Relaciones de la potencia	561
8.2	RELACIONES DE DISPERSIÓN EN LAS MULTIPUERTAS	562
	Matriz de dispersión	564
	Relación con las matrices de las impedancias y de las admitancias	567
	La normalización y la multipuerta aumentada	568
8.3	LA MATRIZ DE DISPERSIÓN Y LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA	570
	Interpretación de los parámetros de dispersión	570
8.4	PROPIEDADES DE LA MATRIZ DE DISPERSIÓN	575
	Propiedades de las redes bipuerta	578
	Aplicación—Filtrado o igualación	579
	Limitaciones introducidas por la capacidad parásita	582
8.5	NORMALIZACIÓN COMPLEJA	587
	Normalización independiente de la frecuencia	590
	Amplificador de resistencia negativa	598
PROBLEMAS		603
9.	GRAFOS DE DIRECCIÓN DE LA SEÑAL Y REALIMENTACIÓN	617
9.1	UN DIAGRAMA OPERATIVO	618
9.2	GRAFOS DE DIRECCIÓN DE LA SEÑAL	622
	Propiedades del grafo	625
	Inversión de un grafo	626
	Reducción de un grafo	628
	Reducción a un grafo esencial	635
	Fórmula de la ganancia del grafo	636
	Trazado del grafo de dirección de la señal de una red	639

9.3	REALIMENTACIÓN	644
	Cociente de retorno y diferencia de retorno	645
	Sensibilidad	648
9.4	ESTABILIDAD	649
	Criterio de Routh	653
	Criterio de Hurwitz	654
	Criterio de Liénard-Chipart	655
9.5	CRITERIO DE NYQUIST	657
	Discusión de las hipótesis	661
	Teorema de Nyquist	663
PROBLEMAS		670
10. REDES LINEALMENTE VARIABLES CON EL TIEMPO Y REDES NO LINEALES		
		685
10.1	FORMULACIÓN POR ECUACIÓN DE ESTADO PARA LAS REDES VARIABLES CON EL TIEMPO	686
	Reducción a la forma normal	686
	Componentes del vector de estado	689
10.2	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO PARA REDES VARIABLES CON EL TIEMPO	692
	Caso particular de la solución de la ecuación homogénea	694
	Existencia y unicidad de la solución de la ecuación homogénea	697
	Solución de la ecuación de estado—existencia y unicidad	701
	Redes periódicas	703
10.3	PROPIEDADES DE LA SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO	706
	Lema de Gronwall	706
	Propiedades asintóticas relativas a una referencia invariante en el tiempo	708
	Propiedades asintóticas relativas a una referencia periódica	713
	Propiedades asintóticas relativas a una referencia genérica variable con el tiempo	718

10.4	FORMULACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO PARA REDES NO LINEALES	723
	Formulación topológica	723
	Ecuación de salida	733
10.5	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO EN EL CASO DE REDES NO LINEALES	735
	Existencia y unicidad	735
	Propiedades de la solución	739
10.6	SOLUCIÓN NUMÉRICA	746
	Fórmula de Newton de las diferencias	746
	Fórmulas abiertas	750
	Fórmulas cerradas	752
	Método de Euler	754
	Método de Euler modificado	755
	Método de Adams	756
	Método de Adams modificado	757
	Método de Milne	758
	Método de predicción-corrección	759
	Método de Runge-Kutta	759
	Errores	760
10.7	ESTABILIDAD SEGÚN LIAPUNOV	761
	Definiciones de estabilidad	761
	Teoremas de estabilidad	764
	Teorema de inestabilidad	770
	Construcción de la función de Liapunov	772
	PROBLEMAS	779
Apéndice 1	Funciones generalizadas	807
	A1.1 Cocientes de convolución y funciones generalizadas	809
	A1.2 Algebra de las funciones generalizadas	811
	Cociente de convolución de funciones generalizadas	813
	A1.3 Funciones generalizadas particulares	814

Ciertas funciones continuas	816
Funciones localmente integrables	817
A1.4 Las funciones generalizadas como operadores	820
Función impulso	823
A1.5 Ecuaciones integrodiferenciales	825
A1.6 Transformada de Laplace de una función generalizada	827

Apéndice 2 Teoría de funciones de variable compleja 831

A2.1 Funciones analíticas	831
A2.2 Aplicación	835
A2.3 Integración	839
Teorema de la integral de Cauchy	840
Fórmula de la integral de Cauchy	843
Teorema del módulo máximo y lema de Schwartz	844
A2.4 Series infinitas	846
Serie de Taylor	847
Serie de Laurent	849
Funciones definidas por series	852
A2.5 Funciones multiformes	853
Función logarítmica	853
Puntos de ramificación, cortes y superficies de Riemann	855
Clasificación de las funciones multiformes	858
A2.6 Teorema de los residuos	859
Cálculo de integrales definidas	862
Lema de Jordan	863
Principio del argumento	866
A2.7 Desarrollo en fracciones simples	869
A2.8 Prolongación analítica	870

Apéndice 3 Teoría de las transformadas de Laplace 873

xx	ÍNDICE ANALÍTICO	
	A3.1 Transformadas de Laplace: definición y propiedades de convergencia	873
	A3.2 Propiedades analíticas de la transformada de Laplace	878
	A3.3 Operaciones con las funciones objeto e imagen	881
	Convolución real y compleja	882
	Diferenciación e integración	883
	Teoremas del valor inicial y del valor final	885
	Traslación	886
	A3.4 Integral de inversión compleja	887
	Bibliografía	893
	ÍNDICE ALFABÉTICO	899