



# CONTENIDO

PREFACIO XVII

RECONOCIMIENTOS XXV

PRÓLOGO XXVII

## 1 SEÑALES Y SISTEMAS 1

1.0 Introducción 1

1.1 Señales continuas y discretas 1

1.1.1 Ejemplos y representación matemática 1

1.1.2 Señales de energía y de potencia 5

1.2 Transformaciones de la variable independiente 7

1.2.1 Ejemplos de transformaciones de la variable independiente 8

1.2.2 Señales periódicas 11

1.2.3 Señales par e impar 13

1.3 Señales exponenciales y senoidales 14

1.3.1 Señales continuas exponencial compleja y senoidal 15

1.3.2 Señales discretas exponencial compleja y senoidal 21

1.3.3 Propiedades de periodicidad de exponenciales discretas 25

1.4 Las funciones impulso unitario y escalón unitario 30

1.4.1 Las secuencias discretas impulso unitario y escalón unitario 30

1.4.2 Las funciones continuas escalón unitario e impulso unitario 32

1.5 Sistemas continuos y discretos 38

1.5.1 Ejemplos sencillos de sistemas 39

1.5.2 Interconexiones de sistemas 41

1.6 Propiedades básicas de los sistemas 44

1.6.1 Sistemas con y sin memoria 44

1.6.2 Invertibilidad y sistemas inversos 45

1.6.3 Causalidad 46

1.6.4 Estabilidad 48

1.6.5 Invariancia en el tiempo 50

1.6.6 Linealidad 53

1.7 Resumen 56

Problemas 57

## 2 SISTEMAS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO 74

2.0 Introducción 74

2.1 Sistemas LTI discretos: La suma de convolución 75

- 2.1.1 La representación de señales discretas en términos de los impulsos 75
- 2.1.2 La respuesta al impulso unitario discreto y la representación de la suma de convolución de sistemas LTI 77
- 2.2 Sistemas LTI continuos: La integral de convolución 90**
  - 2.2.1 La representación de señales continuas en términos de los impulsos 90
  - 2.2.2 La respuesta al impulso unitario continuo y la representación de la integral de convolución de sistemas LTI 94
- 2.3 Propiedades de los sistemas lineales e invariantes en el tiempo 103**
  - 2.3.1 Propiedad conmutativa 104
  - 2.3.2 Propiedad distributiva 104
  - 2.3.3 Propiedad asociativa 107
  - 2.3.4 Sistemas LTI con y sin memoria 108
  - 2.3.5 Invertibilidad de sistemas LTI 109
  - 2.3.6 Causalidad para los sistemas LTI 112
  - 2.3.7 Estabilidad para los sistemas LTI 113
  - 2.3.8 Respuesta al escalón unitario de un sistema LTI 115
- 2.4 Sistemas LTI causales descritos por ecuaciones diferenciales y de diferencias 116**
  - 2.4.1 Ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes 117
  - 2.4.2 Ecuaciones de diferencias lineales con coeficientes constantes 121
  - 2.4.3 Representación en diagrama de bloque de sistemas de primer orden descritos mediante ecuaciones diferenciales y de diferencias 124
- 2.5 Funciones singulares 127**
  - 2.5.1 El impulso unitario como un pulso corto idealizado 128
  - 2.5.2 Definición del impulso unitario mediante la convolución 131
  - 2.5.3 Dobletes unitarios y otras funciones singulares 132
- 2.6 Resumen 137**
  - Problemas 137

### **3 REPRESENTACIÓN DE SEÑALES PERIÓDICAS EN SERIES DE FOURIER 177**

- 3.0 Introducción 177**
- 3.1 Una perspectiva histórica 178**
- 3.2 La respuesta de sistemas LTI a exponenciales complejas 182**
- 3.3 Representación en series de Fourier de señales periódicas continuas 186**
  - 3.3.1 Combinaciones lineales de exponenciales complejas relacionadas armónicamente 186
  - 3.3.2 Determinación de la representación en series de Fourier de una señal periódica continua 190
- 3.4 Convergencia de las series de Fourier 195**
- 3.5 Propiedades de la serie continua de Fourier 202**
  - 3.5.1 Linealidad 202
  - 3.5.2 Desplazamiento de tiempo 202
  - 3.5.3 Inversión de tiempo 203
  - 3.5.4 Escalamiento de tiempo 204

- 3.5.5 Multiplicación 204
- 3.5.6 Conjugación y simetría conjugada 204
- 3.5.7 Relación de Parseval para señales periódicas continuas 205
- 3.5.8 Resumen de las propiedades de la serie continua de Fourier 205
- 3.5.9 Ejemplos 205
- 3.6 Representación en series de Fourier de señales periódicas discretas 211**
  - 3.6.1 Combinaciones lineales de exponenciales complejas relacionadas armónicamente 211
  - 3.6.2 Determinación de la representación en series de Fourier de una señal periódica 212
- 3.7 Propiedades de la serie discreta de Fourier 221**
  - 3.7.1 Multiplicación 222
  - 3.7.2 Primera diferencia 222
  - 3.7.3 Relación de Parseval para señales periódicas discretas 223
  - 3.7.4 Ejemplos 223
- 3.8 Serie de Fourier y sistemas LTI 226**
- 3.9 Filtrado 231**
  - 3.9.1 Filtros conformadores de frecuencia 232
  - 3.9.2 Filtros selectivos en frecuencia 236
- 3.10 Ejemplos de filtros continuos descritos mediante ecuaciones diferenciales 239**
  - 3.10.1 Un filtro paso bajas RC sencillo 239
  - 3.10.2 Un filtro paso altas RC sencillo 241
- 3.11 Ejemplos de filtros discretos descritos mediante ecuaciones de diferencias 244**
  - 3.11.1 Filtros recursivos discretos de primer orden 244
  - 3.11.2 Filtros no recursivos discretos 245
- 3.12 Resumen 249**
  - Problemas 250**

## **4 LA TRANSFORMADA CONTINUA DE FOURIER 284**

- 4.0 Introducción 284**
- 4.1 Representación de señales aperiódicas: La transformada continua de Fourier 285**
  - 4.1.1 Desarrollo de la representación de la transformada de Fourier de una señal aperiódica 285
  - 4.1.2 Convergencia de las transformadas de Fourier 289
  - 4.1.3 Ejemplos de transformadas continuas de Fourier 290
- 4.2 La transformada de Fourier para señales periódicas 296**
- 4.3 Propiedades de la transformada continua de Fourier 300**
  - 4.3.1 Linealidad 301
  - 4.3.2 Desplazamiento de tiempo 301
  - 4.3.3 Conjugación y simetría conjugada 303
  - 4.3.4 Diferenciación e integración 306

- 4.3.5 Escalamiento de tiempo y de frecuencia 308
- 4.3.6 Dualidad 309
- 4.3.7 Relación de Parseval 312
- 4.4 La propiedad de convolución 314**
  - 4.4.1 Ejemplos 317
- 4.5 La propiedad de multiplicación 322**
  - 4.5.1 Filtrado selectivo en frecuencia con frecuencia central variable 325
- 4.6 Tablas de las propiedades de Fourier y de los pares básicos de transformadas de Fourier 328**
- 4.7 Sistemas caracterizados por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes 330**
- 4.8 Resumen 333**
  - Problemas 334

## **5 LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO DISCRETO 358**

- 5.0 Introducción 358**
- 5.1 Representación de señales aperiódicas: La transformada de Fourier de tiempo discreto 359**
  - 5.1.1 Desarrollo de la transformada de Fourier de tiempo discreto 359
  - 5.1.2 Ejemplos de transformadas de Fourier de tiempo discreto 362
  - 5.1.3 Problemas de la convergencia asociados con la transformada de Fourier de tiempo discreto 366
- 5.2 La transformada de Fourier para señales periódicas 367**
- 5.3 Propiedades de la transformada de Fourier de tiempo discreto 372**
  - 5.3.1 Periodicidad de la transformada de Fourier de tiempo discreto 373
  - 5.3.2 Linealidad de la transformada de Fourier 373
  - 5.3.3 Desplazamiento de tiempo y desplazamiento de frecuencia 373
  - 5.3.4 Conjugación y simetría conjugada 375
  - 5.3.5 Diferenciación y acumulación 375
  - 5.3.6 Inversión en tiempo 376
  - 5.3.7 Expansión en tiempo 377
  - 5.3.8 Diferenciación en frecuencia 380
  - 5.3.9 La relación de Parseval 380
- 5.4 La propiedad de convolución 382**
  - 5.4.1 Ejemplos 383
- 5.5 La propiedad de multiplicación 388**
- 5.6 Tablas de las propiedades de la transformada de Fourier y pares básicos de la transformada de Fourier 390**
- 5.7 Dualidad 390**
  - 5.7.1 Dualidad en la serie discreta de Fourier 391
  - 5.7.2 Dualidad entre la transformada de Fourier de tiempo discreto y la serie continua de Fourier 395
- 5.8 Sistemas caracterizados por ecuaciones en diferencias lineales con coeficientes constantes 396**

- 5.9 **Resumen** 399  
**Problemas** 400

## **6 CARACTERIZACIÓN EN TIEMPO Y FRECUENCIA DE SEÑALES Y SISTEMAS 423**

- 6.0 **Introducción** 423
- 6.1 **Representación de la magnitud-fase de la transformada de Fourier** 423
- 6.2 **Representación de la magnitud-fase de la respuesta en frecuencia de sistemas LTI** 427
- 6.2.1 Fases lineal y no lineal 428
- 6.2.2 Retardo de grupo 430
- 6.2.3 Magnitud logarítmica y diagramas de Bode 436
- 6.3 **Propiedades en el dominio del tiempo de filtros ideales selectivos en frecuencia** 439
- 6.4 **Aspectos en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia de los filtros no ideales** 444
- 6.5 **Sistemas continuos de primer y segundo órdenes** 448
- 6.5.1 Sistemas continuos de primer orden 448
- 6.5.2 Sistemas continuos de segundo orden 451
- 6.5.3 Diagramas de Bode para respuestas en frecuencia racionales 456
- 6.6 **Sistemas discretos de primer y segundo órdenes** 461
- 6.6.1 Sistemas discretos de primer orden 461
- 6.6.2 Sistemas discretos de segundo orden 465
- 6.7 **Ejemplos de análisis de sistemas en el dominio del tiempo y de la frecuencia** 472
- 6.7.1 Análisis de un sistema de suspensión para automóvil 473
- 6.7.2 Ejemplos de filtros discretos no recursivos 476
- 6.8 **Resumen** 482  
**Problemas** 483

## **7 MUESTREO 514**

- 7.0 **Introducción** 514
- 7.1 **Representación de una señal continua mediante sus muestras: El teorema de muestreo** 515
- 7.1.1 Muestreo con tren de impulsos 516
- 7.1.2 Muestreo con un retenedor de orden cero 520
- 7.2 **Reconstrucción de una señal a partir de sus muestras usando la interpolación** 522
- 7.3 **El efecto del submuestreo: Traslape** 527
- 7.4 **Procesamiento discreto de señales continuas** 534
- 7.4.1 Diferenciador digital 541
- 7.4.2 Retardo de media muestra 543
- 7.5 **Muestreo de señales discretas** 545
- 7.5.1 Muestreo con tren de impulsos 545

7.5.2 Decimación en tiempo discreto e interpolación 549

7.6 Resumen 555

Problemas 556

## 8 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN 582

8.0 Introducción 582

8.1 Modulación de amplitud con exponencial compleja y senoidal 583

8.1.1 Modulación de amplitud con una portadora exponencial compleja 583

8.1.2 Modulación de amplitud con una portadora senoidal 585

8.2 Demodulación para AM senoidal 587

8.2.1 Demodulación síncrona 587

8.2.2 Demodulación asíncrona 590

8.3 Multiplexaje por división de frecuencia 594

8.4 Modulación de amplitud senoidal de banda lateral única 597

8.5 Modulación de amplitud con una portadora de tren de pulsos 601

8.5.1 Modulación de una portadora de tren de pulsos 601

8.5.2 Multiplexaje por división de tiempo 604

8.6 Modulación de amplitud de pulsos 604

8.6.1 Señales moduladas por amplitud de pulsos 604

8.6.2 Interferencia intersímbolo en sistemas PAM 607

8.6.3 Modulación digital por amplitud de pulsos y por codificación de pulsos 610

8.7 Modulación de frecuencia senoidal 611

8.7.1 Modulación de frecuencia de banda angosta 613

8.7.2 Modulación de frecuencia de banda ancha 615

8.7.3 Señal moduladora de onda cuadrada periódica 617

8.8 Modulación discreta 619

8.8.1 Modulación de amplitud senoidal discreta 619

8.8.2 Transmodulación de tiempo discreto 623

8.9 Resumen 623

Problemas 625

## 9 LA TRANSFORMADA DE LAPLACE 654

9.0 Introducción 654

9.1 La transformada de Laplace 655

9.2 La región de convergencia para las transformadas de Laplace 662

9.3 La transformada inversa de Laplace 670

9.4 Evaluación geométrica de la transformada de Fourier a partir del diagrama de polos y ceros 674

9.4.1 Sistemas de primer orden 676

9.4.2 Sistemas de segundo orden 677

9.4.3 Sistemas pasa todo 681

9.5 Propiedades de la transformada de Laplace 682

- 9.5.1 Linealidad de la transformada de Laplace 683
- 9.5.2 Desplazamiento en el tiempo 684
- 9.5.3 Desplazamiento en el dominio de  $s$  685
- 9.5.4 Escalamiento en tiempo 685
- 9.5.5 Conjugación 687
- 9.5.6 Propiedad de convolución 687
- 9.5.7 Diferenciación en el dominio del tiempo 688
- 9.5.8 Diferenciación en el dominio de  $s$  688
- 9.5.9 Integración en el dominio del tiempo 690
- 9.5.10 Los teoremas de valor inicial y de valor final 690
- 9.5.11 Tabla de propiedades 691
- 9.6 Algunos pares de transformadas de Laplace 692**
- 9.7 Análisis y caracterización de los sistemas LTI usando la transformada de Laplace 693**
  - 9.7.1 Causalidad 693
  - 9.7.2 Estabilidad 695
  - 9.7.3 Sistemas LTI caracterizados por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes 698
  - 9.7.4 Ejemplos que relacionan el comportamiento del sistema con la función del sistema 701
  - 9.7.5 Filtros Butterworth 703
- 9.8 Álgebra de la función del sistema y representación en diagrama de bloques 706**
  - 9.8.1 Funciones del sistema para interconexiones de sistemas LTI 707
  - 9.8.2 Representaciones en diagrama de bloques para los sistemas LTI causales descritos por ecuaciones diferenciales y funciones racionales del sistema 708
- 9.9 La transformada unilateral de Laplace 714**
  - 9.9.1 Ejemplo de transformadas unilaterales de Laplace 714
  - 9.9.2 Propiedades de la transformada unilateral de Laplace 716
  - 9.9.3 Solución de ecuaciones diferenciales usando la unilateral transformada de Laplace 719
- 9.10 Resumen 720**
- Problemas 721**

## **10 LA TRANSFORMADA $z$ 741**

- 10.0 Introducción 741**
- 10.1 La transformada  $z$  741**
- 10.2 La región de convergencia de la transformada  $z$  748**
- 10.3 La transformada  $z$  inversa 757**
- 10.4 Evaluación geométrica de la transformada de Fourier a partir del diagrama de polos y ceros 763**
  - 10.4.1 Sistemas de primer orden 763
  - 10.4.2 Sistemas de segundo orden 765
- 10.5 Propiedades de la transformada  $z$  767**
  - 10.5.1 Linealidad 767

- 10.5.2 Desplazamiento en tiempo 767
- 10.5.3 Escalamiento en el dominio de  $z$  768
- 10.5.4 Inversión de tiempo 769
- 10.5.5 Expansión en el tiempo 769
- 10.5.6 Conjugación 770
- 10.5.7 Propiedad de convolución 770
- 10.5.8 Diferenciación en el dominio de  $z$  772
- 10.5.9 Teorema del valor inicial 773
- 10.5.10 Resumen de propiedades 774
- 10.6 Algunos pares comunes de transformada  $z$  774**
- 10.7 Análisis y caracterización de los sistemas LTI usando las transformadas  $z$  774**
  - 10.7.1 Causalidad 776
  - 10.7.2 Estabilidad 777
  - 10.7.3 Sistemas LTI caracterizados por ecuaciones de diferencias lineales con coeficientes constantes 779
  - 10.7.4 Ejemplos que relacionan el comportamiento del sistema con la función del sistema 781
- 10.8 Álgebra de función del sistema y representaciones en diagramas de bloques 783**
  - 10.8.1 Funciones de sistema de interconexiones de sistemas LTI 784
  - 10.8.2 Representaciones en diagramas de bloques para los sistemas LTI causales descritos por ecuaciones de diferencias y funciones de sistema racionales 784
- 10.9 La transformada  $z$  unilateral 789**
  - 10.9.1 Ejemplos de transformadas  $z$  unilaterales y transformadas inversas 790
  - 10.9.2 Propiedades de la transformada  $z$  unilateral 792
  - 10.9.3 Solución de ecuaciones de diferencias usando la transformada  $z$  unilateral 795
- 10.10 Resumen 796**
  - Problemas 797**

# 11 SISTEMAS LINEALES RETROALIMENTADOS 816

- 11.0 Introducción 816**
- 11.1 Sistemas lineales retroalimentados 819**
- 11.2 Algunas aplicaciones y consecuencias de la retroalimentación 820**
  - 11.2.1 Diseño de un sistema inverso 820
  - 11.2.2 Compensación de elementos no ideales 821
  - 11.2.3 Estabilización de sistemas inestables 823
  - 11.2.4 Sistemas retroalimentados para datos muestreados 826
  - 11.2.5 Sistemas de rastreo 828
  - 11.2.6 Desestabilización causada por la retroalimentación 830
- 11.3 Análisis del lugar geométrico de las raíces de los sistemas lineales retroalimentados 832**
  - 11.3.1 Un ejemplo introductorio 833

11.3.2	Ecuación para los polos de lazo cerrado	834
11.3.3	Los puntos extremos del lugar geométrico de las raíces: los polos de lazo cerrado para $K = 0$ y $ K  = +\infty$	836
11.3.4	El criterio del ángulo	836
11.3.5	Propiedades del lugar geométrico de las raíces	841
<b>11.4</b>	<b>El criterio de estabilidad de Nyquist</b>	<b>846</b>
11.4.1	La propiedad de circunvalación	847
11.4.2	El criterio de Nyquist para sistemas LTI retroalimentados continuos	850
11.4.3	El criterio de Nyquist para sistemas LTI retroalimentados discretos	856
<b>11.5</b>	<b>Márgenes de ganancia y fase</b>	<b>858</b>
<b>11.6</b>	<b>Resumen</b>	<b>866</b>
	<b>Problemas</b>	<b>867</b>

**APÉNDICE EXPANSIÓN EN FRACCIONES PARCIALES 909**

**BIBLIOGRAFÍA 921**

**RESPUESTAS 931**

**ÍNDICE 941**