

# Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Señales, sistemas y tratamiento de señales</b>	<b>2</b>
1.1.1	Elementos básicos de un sistema de tratamiento digital de señales	4
1.1.2	Ventajas del tratamiento digital de señales sobre el analógico	5
<b>1.2</b>	<b>Clasificación de las señales</b>	<b>5</b>
1.2.1	Señales multicanal y multidimensionales	6
1.2.2	Señales continuas y discretas en el dominio del tiempo	8
1.2.3	Señales continuas y señales discretas	9
1.2.4	Señales deterministas y señales aleatorias	9
<b>1.3</b>	<b>Concepto de frecuencia en señales continuas y discretas en el tiempo</b>	<b>10</b>
1.3.1	Señales sinusoidales continuas en el tiempo	10
1.3.2	Señales sinusoidales discretas en el tiempo	12
1.3.3	Exponenciales complejas armónicamente relacionadas	15
<b>1.4</b>	<b>Conversiones analógica-digital y digital-analógica</b>	<b>17</b>
1.4.1	Muestreo de señales analógicas	18
1.4.2	Teorema de muestreo	23
1.4.3	Cuantificación de señales continuas en amplitud	27
1.4.4	Cuantificación de señales sinusoidales	29
1.4.5	Codificación de muestras cuantificadas	31
1.4.6	Conversión digital-analógica	31
1.4.7	Análisis de señales y sistemas digitales frente a señales y sistemas discretos en el tiempo	32
<b>1.5</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>32</b>
	Problemas	33
<b>2</b>	<b>Señales y sistemas discretos en el tiempo</b>	<b>37</b>
<b>2.1</b>	<b>Señales discretas en el tiempo</b>	<b>37</b>
2.1.1	Algunas señales discretas en el tiempo elementales	39
2.1.2	Clasificación de las señales discretas en el tiempo	41
2.1.3	Manipulaciones simples de las señales discretas en el tiempo	44
<b>2.2</b>	<b>Sistemas discretos en el tiempo</b>	<b>48</b>
2.2.1	Descripción de entrada-salida de los sistemas	49
2.2.2	Diagrama de bloques de los sistemas discretos en el tiempo	51
2.2.3	Clasificación de los sistemas discretos en el tiempo	53
2.2.4	Interconexión de sistemas discretos en el tiempo	61

<b>2.3</b>	<b>Análisis de sistemas lineales discretos e invariantes en el tiempo</b> .....	<b>.62</b>
2.3.1	Técnicas para el análisis de los sistemas lineales .....	.62
2.3.2	Descomposición en impulsos de una señal discreta en el tiempo .....	.64
2.3.3	Respuesta de los sistemas LTI a entradas arbitrarias: la convolución .....	.65
2.3.4	Propiedades de la convolución y la interconexión de sistemas LTI .....	.71
2.3.5	Sistemas lineales invariantes en el tiempo causales .....	.74
2.3.6	Estabilidad de los sistemas lineales invariantes en el tiempo .....	.76
2.3.7	Sistemas con respuestas al impulso de duración finita e infinita .....	.79
<b>2.4</b>	<b>Sistemas discretos en el tiempo descritos mediante ecuaciones en diferencias</b> .....	<b>.79</b>
2.4.1	Sistemas discretos en el tiempo recursivos y no recursivos .....	.80
2.4.2	Sistemas lineales invariantes en el tiempo caracterizados por ecuaciones en diferencias de coeficientes constantes .....	.83
2.4.3	Solución de las ecuaciones en diferencias lineales de coeficientes constantes ...	.87
2.4.4	Respuesta al impulso de un sistema recursivo, lineal e invariante en el tiempo ..	.94
<b>2.5</b>	<b>Implementación de sistemas discretos en el tiempo</b> .....	<b>.96</b>
2.5.1	Estructuras para la realización de sistemas lineales invariantes en el tiempo ...	.97
2.5.2	Realización de sistemas FIR recursivos y no recursivos .....	.100
<b>2.6</b>	<b>Correlación de señales discretas en el tiempo</b> .....	<b>.103</b>
2.6.1	Secuencias de correlación cruzada y autocorrelación .....	.104
2.6.2	Propiedades de la autocorrelación y de la correlación cruzada .....	.106
2.6.3	Correlación de secuencias periódicas .....	.109
2.6.4	Secuencias de correlación de entrada-salida .....	.112
<b>2.7</b>	<b>Resumen y referencias</b> .....	<b>.113</b>
	<b>Problemas</b> .....	<b>.114</b>
<b>3</b>	<b>La transformada <math>z</math> y sus aplicaciones al análisis de los sistemas LTI</b> .....	<b>.131</b>
<b>3.1</b>	<b>La transformada <math>z</math></b> .....	<b>.131</b>
3.1.1	La transformada $z$ directa .....	.132
3.1.2	La transformada $z$ inversa .....	.138
<b>3.2</b>	<b>Propiedades de la transformada <math>z</math></b> .....	<b>.140</b>
<b>3.3</b>	<b>Transformadas <math>z</math> racionales</b> .....	<b>.152</b>
3.3.1	Polos y ceros .....	.152
3.3.2	Posición de los polos y comportamiento en el dominio del tiempo de señales causales .....	.155
3.3.3	Función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo .....	.158
<b>3.4</b>	<b>Inversión de la transformada <math>z</math></b> .....	<b>.161</b>
3.4.1	Transformada $z$ inversa por integración de contorno .....	.161
3.4.2	Transformada $z$ inversa mediante expansión en serie de potencias .....	.163
3.4.3	Transformada $z$ inversa mediante expansión en fracciones parciales .....	.165
3.4.4	Descomposición de las transformadas $z$ racionales .....	.172
<b>3.5</b>	<b>Análisis en el dominio <math>z</math> de sistemas LTI</b> .....	<b>.173</b>
3.5.1	Respuesta de sistemas con funciones de transferencia racionales .....	.173
3.5.2	Respuestas transitoria y en régimen permanente .....	.174
3.5.3	Causalidad y estabilidad .....	.176

3.5.4	Cancelaciones polo-cero .....	177
3.5.5	Polos de orden múltiple y estabilidad .....	179
3.5.6	Estabilidad de los sistemas de segundo orden .....	180
<b>3.6</b>	<b>Transformada <math>z</math> unilateral .....</b>	<b>183</b>
3.6.1	Definición y propiedades .....	184
3.6.2	Solución de las ecuaciones en diferencias .....	188
3.6.3	Respuesta de los sistemas de polos y ceros con condiciones iniciales distintas de cero .....	189
<b>3.7</b>	<b>Resumen y referencias .....</b>	<b>191</b>
	<b>Problemas .....</b>	<b>192</b>
<b>4</b>	<b>Análisis en frecuencia de señales .....</b>	<b>203</b>
<b>4.1</b>	<b>Análisis en frecuencia de las señales continuas en el tiempo .....</b>	<b>203</b>
4.1.1	Series de Fourier para señales periódicas continuas en el tiempo .....	205
4.1.2	Espectro de densidad de potencia de señales periódicas .....	208
4.1.3	Transformada de Fourier de señales aperiódicas continuas en el tiempo .....	211
4.1.4	Espectro de densidad de energía de señales aperiódicas .....	215
<b>4.2</b>	<b>Análisis en frecuencia de señales discretas en el tiempo .....</b>	<b>218</b>
4.2.1	Serie de Fourier para señales periódicas discretas en el tiempo .....	218
4.2.2	Espectro de densidad de potencia de señales periódicas .....	221
4.2.3	Transformada de Fourier de señales aperiódicas discretas en el tiempo .....	224
4.2.4	Convergencia de la transformada de Fourier .....	226
4.2.5	Espectro de densidad de energía de señales aperiódicas .....	229
4.2.6	Relaciones entre la transformada de Fourier y la transformada $z$ .....	233
4.2.7	El Cepstro .....	235
4.2.8	Transformada de Fourier de señales con polos en la circunferencia unidad ....	236
4.2.9	Clasificación de las señales en el dominio de la frecuencia: concepto de ancho de banda .....	238
4.2.10	Rangos de frecuencia de algunas señales naturales .....	240
<b>4.3</b>	<b>Propiedades de la señal en los dominios de la frecuencia y del tiempo .....</b>	<b>241</b>
<b>4.4</b>	<b>Propiedades de la transformada de Fourier para señales discretas en el tiempo .....</b>	<b>244</b>
4.4.1	Propiedades de simetría de la transformada de Fourier .....	245
4.4.2	Propiedades y teoremas de la transformada de Fourier .....	252
<b>4.5</b>	<b>Resumen y referencias .....</b>	<b>260</b>
	<b>Problemas .....</b>	<b>261</b>
<b>5</b>	<b>Análisis en el dominio de la frecuencia de sistemas LTI .....</b>	<b>269</b>
<b>5.1</b>	<b>Características en el dominio de la frecuencia de los sistemas LTI .....</b>	<b>269</b>
5.1.1	Respuesta a señales sinusoidales y exponenciales complejas: función de respuesta en frecuencia .....	270
5.1.2	Respuestas en régimen permanente y transitoria a señales de entrada sinusoidales .....	277
5.1.3	Respuesta en régimen permanente a señales de entrada periódicas .....	278
5.1.4	Respuesta a señales de entrada aperiódicas .....	279

<b>5.2</b>	<b>Respuesta en frecuencia de los sistemas LTI</b>	<b>281</b>
5.2.1	Respuesta en frecuencia de un sistema definido mediante una función racional	281
5.2.2	Cálculo de la respuesta en frecuencia	284
<b>5.3</b>	<b>Espectros y funciones de correlación en la salida de los sistemas LTI</b>	<b>288</b>
5.3.1	Espectros y funciones de correlación de entrada-salida	288
5.3.2	Funciones de correlación y espectros de potencia de señales de entrada aleatorias	289
<b>5.4</b>	<b>Sistemas LTI como filtros selectivos de frecuencia</b>	<b>291</b>
5.4.1	Características del filtro ideal	292
5.4.2	Filtros paso bajo, paso alto y paso banda	294
5.4.3	Resonadores digitales	299
5.4.4	Filtros de hendidura	302
5.4.5	Filtros peine	304
5.4.6	Filtros paso todo	308
5.4.7	Osciladores sinusoidales digitales	310
<b>5.5</b>	<b>Sistemas inversos y deconvolución</b>	<b>312</b>
5.5.1	Invertibilidad de los sistemas LTI	313
5.5.2	Sistemas de fase mínima, fase máxima y fase mixta	316
5.5.3	Identificación del sistema y deconvolución	320
5.5.4	Deconvolución homomórfica	322
<b>5.6</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>323</b>
	<b>Problemas</b>	<b>324</b>
<b>6</b>	<b>Muestreo y reconstrucción de señales</b>	<b>344</b>
<b>6.1</b>	<b>Muestreo y reconstrucción ideales de señales continuas en el tiempo</b>	<b>344</b>
<b>6.2</b>	<b>Tratamiento discreto en el tiempo de señales continuas en el tiempo</b>	<b>353</b>
<b>6.3</b>	<b>Convertidores analógico-digital y digital-analógico</b>	<b>359</b>
6.3.1	Convertidores analógico-digitales	360
6.3.2	Cuantificación y codificación	361
6.3.3	Análisis de los errores de cuantificación	364
6.3.4	Convertidores digitales-analógicos	366
<b>6.4</b>	<b>Muestreo y reconstrucción de señales paso banda continuas en el tiempo</b>	<b>368</b>
6.4.1	Muestreo uniforme o de primer orden	368
6.4.2	Muestreo intercalado o no uniforme de segundo orden	374
6.4.3	Representaciones de señales paso banda	379
6.4.4	Muestreo empleando las representaciones de la señal paso banda	381
<b>6.5</b>	<b>Muestreo de señales discretas en el tiempo</b>	<b>382</b>
6.5.1	Muestreo e interpolación de señales discretas en el tiempo	383
6.5.2	Representación y muestreo de señales paso banda discretas en el tiempo	387
<b>6.6</b>	<b>Convertidores A/D y D/A con sobremuestreo</b>	<b>388</b>
6.6.1	Convertidores A/D con sobremuestreo	388
6.6.2	Convertidores D/A con sobremuestreo	393
<b>6.7</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>394</b>
	<b>Problemas</b>	<b>395</b>

<b>7</b>	<b>Transformada discreta de Fourier: propiedades y aplicaciones</b>	<b>403</b>
<b>7.1</b>	<b>Muestreo en el dominio de la frecuencia: la transformada discreta de Fourier</b>	<b>403</b>
7.1.1	Muestreo en el dominio de la frecuencia y reconstrucción de señales discretas en el tiempo	403
7.1.2	Transformada discreta de Fourier (DFT)	409
7.1.3	La DFT como una transformación lineal	411
7.1.4	Relación de la DFT con otras transformadas	414
<b>7.2</b>	<b>Propiedades de la DFT</b>	<b>416</b>
7.2.1	Propiedades de periodicidad, linealidad y simetría	416
7.2.2	Multiplicación de dos DFT y convolución circular	421
7.2.3	Propiedades adicionales de la DFT	426
<b>7.3</b>	<b>Métodos de filtrado lineal basados en la DFT</b>	<b>430</b>
7.3.1	Uso de la DFT en el filtrado lineal	430
7.3.2	Filtrado de secuencias de datos largas	434
<b>7.4</b>	<b>Análisis en frecuencia de señales utilizando la DFT</b>	<b>436</b>
<b>7.5</b>	<b>Transformada discreta del coseno</b>	<b>443</b>
7.5.1	DCT directa	443
7.5.2	DCT inversa	444
7.5.3	La DCT como transformada ortogonal	445
<b>7.6</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>449</b>
	<b>Problemas</b>	<b>449</b>
<b>8</b>	<b>Cálculo eficiente de la DFT: algoritmos de la transformada rápida de Fourier</b>	<b>458</b>
<b>8.1</b>	<b>Cálculo eficiente de la DFT: algoritmos FFT</b>	<b>458</b>
8.1.1	Cálculo directo de la DFT	459
8.1.2	Método divide y vencerás para calcular la DFT	460
8.1.3	Algoritmos FFT base 2	465
8.1.4	Algoritmos FFT base 4	472
8.1.5	Algoritmos FFT de base dividida	477
8.1.6	Implementación de los algoritmos FFT	480
<b>8.2</b>	<b>Aplicaciones de los algoritmos FFT</b>	<b>481</b>
8.2.1	Cálculo eficiente de la DFT de dos secuencias reales	481
8.2.2	Cálculo eficiente de la DFT de una secuencia real de $2N$ puntos	482
8.2.3	Uso de los algoritmos FFT en el filtrado lineal y la correlación	483
<b>8.3</b>	<b>Método de filtrado lineal para calcular la DFT</b>	<b>485</b>
8.3.1	Algoritmo de Goertzel	485
8.3.2	Algoritmo de la transformada $z$ chirp	487
<b>8.4</b>	<b>Efectos de cuantificación en el cálculo de la DFT</b>	<b>491</b>
8.4.1	Efectos de cuantificación en el cálculo directo de la DFT	491
8.4.2	Errores de cuantificación en los algoritmos FFT	493
<b>8.5</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>496</b>
	<b>Problemas</b>	<b>497</b>

<b>9</b>	<b>Implementación de sistemas discretos en el tiempo</b>	<b>.503</b>
9.1	Estructuras para la realización de sistemas discretos del tiempo	.503
9.2	Estructuras para sistemas FIR	.505
9.2.1	Estructura de la forma directa	.506
9.2.2	Estructuras en cascada	.506
9.2.3	Estructuras basadas en el muestreo en frecuencia	.508
9.2.4	Estructura en celosía	.513
9.3	Estructuras para sistemas IIR	.520
9.3.1	Estructuras en forma directa	.520
9.3.2	Diagramas de flujo de señales y estructuras transpuestas	.522
9.3.3	Estructuras en cascada	.527
9.3.4	Estructuras en paralelo	.528
9.3.5	Estructuras en celosía y en celosía-escalera para sistemas IIR	.531
9.4	Representación de números	.537
9.4.1	Representación de números en punto fijo	.537
9.4.2	Representación de números en punto flotante binario	.540
9.4.3	Errores debidos al redondeo y el truncamiento	.543
9.5	Cuantificación de los coeficientes del filtro	.546
9.5.1	Análisis de la sensibilidad en la cuantificación de los coeficientes del filtro	.547
9.5.2	Cuantificación de los filtros FIR	.554
9.6	Efectos del redondeo en los filtros digitales	.557
9.6.1	Oscilaciones de ciclo límite en sistemas recursivos	.558
9.6.2	Cambio de escala para impedir el desbordamiento	.562
9.6.3	Caracterización estadística de los efectos de cuantificación en las realizaciones de punto fijo de filtros digitales	.564
9.7	Resumen y referencias	.571
	Problemas	.572
<b>10</b>	<b>Diseño de filtros digitales</b>	<b>.584</b>
10.1	Consideraciones generales	.584
10.1.1	La causalidad y sus implicaciones	.585
10.1.2	Características de los filtros prácticos selectivos en frecuencia	.588
10.2	Diseño de filtros FIR	.589
10.2.1	Filtros FIR simétricos y antisimétricos	.589
10.2.2	Diseño de filtros FIR de fase lineal utilizando ventanas	.592
10.2.3	Diseño de filtros FIR de fase lineal mediante el método basado en el muestreo en frecuencia	.598
10.2.4	Diseño de filtros FIR de fase lineal con rizado constante óptimo	.605
10.2.5	Diseño de diferenciadores FIR	.616
10.2.6	Diseño de transformadores de Hilbert	.619
10.2.7	Comparación de los métodos de diseño de los filtros FIR de fase lineal	.623
10.3	Diseño de filtros IIR a partir de filtros analógicos	.625
10.3.1	Diseño de filtros IIR mediante aproximación de derivadas	.626

10.3.2	Diseño de filtros IIR basado en la invarianza del impulso	630
10.3.3	Diseño de filtros IIR mediante la transformación bilineal	635
10.3.4	Características de los filtros analógicos más comúnmente utilizados	638
10.3.5	Algunos ejemplos de diseños de filtros digitales basados en la transformación bilineal	647
<b>10.4</b>	<b>Transformaciones en frecuencia</b>	<b>648</b>
10.4.1	Transformaciones de frecuencia en el dominio analógico	649
10.4.2	Transformaciones de frecuencia en el dominio digital	652
<b>10.5</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>654</b>
	<b>Problemas</b>	<b>655</b>
<b>11</b>	<b>Tratamiento digital de señales de tasa múltiple</b>	<b>669</b>
<b>11.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>670</b>
<b>11.2</b>	<b>Diezmado por un factor <math>D</math></b>	<b>673</b>
<b>11.3</b>	<b>Interpolación por un factor <math>I</math></b>	<b>677</b>
<b>11.4</b>	<b>Conversión de la frecuencia de muestreo por un factor racional <math>I/D</math></b>	<b>680</b>
<b>11.5</b>	<b>Implementación de la conversión de la frecuencia de muestreo</b>	<b>683</b>
11.5.1	Estructuras de los filtros polifásicos	684
11.5.2	Intercambio de filtros y submuestreadores/sobremuestreadores	685
11.5.3	Conversión de la frecuencia de muestreo mediante filtros peine con integrador conectado en cascada	686
11.5.4	Estructuras polifásicas para filtros de diezmado e interpolación	688
11.5.5	Estructuras para la conversión de la frecuencia de muestreo racional	690
<b>11.6</b>	<b>Implementación multietapa de la conversión de la frecuencia de muestreo</b>	<b>692</b>
<b>11.7</b>	<b>Conversión de la frecuencia de muestreo de señales paso banda</b>	<b>696</b>
<b>11.8</b>	<b>Conversión de la frecuencia de muestreo por un factor arbitrario</b>	<b>696</b>
11.8.1	Remuestreo arbitrario con interpoladores polifásicos	698
11.8.2	Remuestreo arbitrario con estructuras de filtros Farrow	698
<b>11.9</b>	<b>Aplicaciones del tratamiento multitasa de señales</b>	<b>700</b>
11.9.1	Diseño de desplazadores de fase	700
11.9.2	Interfaz de sistemas digitales con diferentes frecuencias de muestreo	701
11.9.3	Implementación de filtros paso bajo de banda estrecha	702
11.9.4	Codificación subbanda de señales de voz	703
<b>11.10</b>	<b>Bancos de filtros digitales</b>	<b>705</b>
11.10.1	Estructuras polifásicas de bancos de filtros uniformes	709
11.10.2	Transmultiplexores	711
<b>11.11</b>	<b>Banco de filtros espejo en cuadratura de dos canales</b>	<b>711</b>
11.11.1	Eliminación del <i>aliasing</i>	713
11.11.2	Condición para una reconstrucción perfecta	715
11.11.3	Forma polifásica del banco de filtros QMF	715
11.11.4	Banco de filtros FIR QMF de fase lineal	715
11.11.5	Banco de filtros IIR QMF	717

11.11.6	Reconstrucción perfecta de bancos de filtros FIR QMF de dos canales	717
11.11.7	Bancos de filtros QMF de dos canales con codificación subbanda	718
<b>11.12</b>	<b>Banco de filtros QMF de <math>M</math> canales</b>	<b>719</b>
11.12.1	Condiciones para reconstrucción perfecta y eliminación del <i>aliasing</i>	721
11.12.2	Forma polifásica del banco de filtros QMF de $M$ canales	721
<b>11.13</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>726</b>
	<b>Problemas</b>	<b>726</b>
<b>12</b>	<b>Predicción lineal y filtros lineales óptimos</b>	<b>735</b>
<b>12.1</b>	<b>Señales aleatorias, funciones de correlación y espectros de potencia</b>	<b>735</b>
12.1.1	Procesos aleatorios	736
12.1.2	Procesos aleatorios estacionarios	737
12.1.3	Promedios estadísticos	737
12.1.4	Promedios estadísticos para procesos aleatorios conjuntos	738
12.1.5	Espectro de densidad de potencia	739
12.1.6	Señales aleatorias discretas en el tiempo	740
12.1.7	Promedios temporales para un proceso aleatorio discreto en el tiempo	741
12.1.8	Procesos ergódicos respecto de la media	742
12.1.9	Procesos ergódicos respecto de la correlación	743
<b>12.2</b>	<b>Representación de innovaciones de un proceso aleatorio estacionario</b>	<b>744</b>
12.2.1	Espectros de potencia racionales	746
12.2.2	Relaciones entre los parámetros del filtro y la autocorrelación	747
<b>12.3</b>	<b>Predicción lineal directa e inversa</b>	<b>748</b>
12.3.1	Predicción lineal directa	748
12.3.2	Predicción lineal inversa	751
12.3.3	Coefficientes de reflexión óptimos para los predictores en celosía directa e inverso	753
12.3.4	Relación entre un proceso auto-regresivo y la predicción lineal	754
<b>12.4</b>	<b>Solución de las ecuaciones normales</b>	<b>754</b>
12.4.1	Algoritmo de Levinson-Durbin	755
12.4.2	El algoritmo de Schur	758
<b>12.5</b>	<b>Propiedades de los filtros lineales de error de predicción</b>	<b>762</b>
<b>12.6</b>	<b>Filtros auto-regresivos en celosía y auto-regresivos de media móvil en celosía-escalera</b>	<b>765</b>
12.6.1	Estructura auto-regresiva en celosía	766
12.6.2	Procesos auto-regresivos de media móvil y filtros en celosía-escalera	767
<b>12.7</b>	<b>Filtros de Wiener para filtrado y predicción</b>	<b>769</b>
12.7.1	Filtro FIR de Wiener	770
12.7.2	Principio de ortogonalidad en la estimación lineal por mínimos cuadrados	772
12.7.3	Filtro IIR de Wiener	773
12.7.4	Filtro de Wiener no causal	777
<b>12.8</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>778</b>
	<b>Problemas</b>	<b>779</b>



<b>13</b>	<b>Filtros adaptativos</b>	<b>785</b>
<b>13.1</b>	<b>Aplicaciones de los filtros adaptativos</b>	<b>785</b>
13.1.1	Identificación del sistema o modelado del sistema	787
13.1.2	Ecuación de canal adaptativa	787
13.1.3	Cancelación de eco en la transmisión de datos a través de canales telefónicos	791
13.1.4	Supresión de interferencias de banda estrecha en una señal de banda ancha	794
13.1.5	Mejorador de línea adaptativo	798
13.1.6	Cancelación de ruido adaptativa	799
13.1.7	Codificación lineal predictiva de señales de voz	799
13.1.8	Matrices adaptativas	802
<b>13.2</b>	<b>Filtros FIR adaptativos en forma directa: el algoritmo LMS</b>	<b>804</b>
13.2.1	Criterio del error cuadrático medio mínimo	805
13.2.2	El algoritmo LMS	807
13.2.3	Algoritmos estocásticos de gradiente	808
13.2.4	Propiedades del algoritmo LMS	810
<b>13.3</b>	<b>Filtros adaptativos en la forma directa: algoritmos RLS</b>	<b>816</b>
13.3.1	Algoritmo RLS	816
13.3.2	Algoritmos de factorización LDU y de raíz cuadrada	820
13.3.3	Algoritmos RLS rápidos	821
13.3.4	Propiedades de los algoritmos RLS para la forma directa	823
<b>13.4</b>	<b>Filtros adaptativos en celosía-escalera</b>	<b>825</b>
13.4.1	Algoritmos recursivos de mínimos cuadrados en celosía-escalera	825
13.4.2	Otros algoritmos en celosía	843
13.4.3	Propiedades de los algoritmos en celosía-escalera	846
<b>13.5</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>849</b>
	<b>Problemas</b>	<b>850</b>
<b>14</b>	<b>Estimación del espectro de potencia</b>	<b>855</b>
<b>14.1</b>	<b>Estimación de los espectros procedentes de observaciones de duración finita de señales</b>	<b>855</b>
14.1.1	Cálculo del espectro de densidad de energía	856
14.1.2	Estimación de la autocorrelación y del espectro de potencia de señales aleatorias: el periodograma	860
14.1.3	Uso de la DFT en la estimación del espectro de potencia	864
<b>14.2</b>	<b>Métodos no paramétricos para la estimación del espectro de potencia</b>	<b>866</b>
14.2.1	El método de Bartlett: promediado de periodogramas	867
14.2.2	Método de Welch: promediado de periodogramas modificados	868
14.2.3	Método de Blackman y Tukey: suavizado del periodograma	870
14.2.4	Prestaciones de los estimadores no paramétricos del espectro de potencia	872
14.2.5	Requisitos de cálculo de los estimados no paramétricos del espectro de potencia	875
<b>14.3</b>	<b>Métodos paramétricos para la estimación del espectro de potencia</b>	<b>876</b>
14.3.1	Relaciones entre la autocorrelación y los parámetros del modelo	878
14.3.2	Método de Yule-Walker para los parámetros del modelo AR	880
14.3.3	Método de Burg para los parámetros del modelo AR	880

14.3.4	Método de mínimos cuadrados no restringido para los parámetros del modelo AR	.883
14.3.5	Métodos de estimación secuenciales para los parámetros del modelo AR	.884
14.3.6	Selección del orden del modelo	.885
14.3.7	Modelo MA para la estimación del espectro de potencia	.886
14.3.8	Modelo ARMA para la estimación del espectro de potencia	.888
14.3.9	Resultados experimentales	.889
<b>14.4</b>	<b>Métodos basados en bancos de filtros</b>	<b>.895</b>
14.4.1	Realización mediante banco de filtros del periodograma	.896
14.4.2	Estimados espectrales de varianza mínima	.899
<b>14.5</b>	<b>Algoritmos de autoanálisis para la estimación del espectro</b>	<b>.902</b>
14.5.1	Método de descomposición armónica de Pisarenko	.903
14.5.2	Autodescomposición de la matriz de autocorrelación para sinusoides en ruido blanco	.905
14.5.3	Algoritmo MUSIC	.907
14.5.4	Algoritmo ESPRIT	.908
14.5.5	Criterios de selección del orden	.911
14.5.6	Resultados experimentales	.911
<b>14.6</b>	<b>Resumen y referencias</b>	<b>.914</b>
	<b>Problemas</b>	<b>.915</b>
<b>A</b>	<b>Generadores de números aleatorios</b>	<b>.925</b>
<b>B</b>	<b>Tablas de los coeficientes de transición para el diseño de filtros FIR de fase lineal</b>	<b>.931</b>
	<b>Referencias y bibliografía</b>	<b>.937</b>
	<b>Respuestas a los problemas seleccionados</b>	<b>.956</b>
	<b>Índice</b>	<b>.967</b>