

# Teoría de Sistemas

4ª Edición

Incluye problemas  
resueltos con MATLAB



# Teoría de Sistemas

F. Matía · A. Jiménez · R. Aracil · E. Pinto

4ª Edición

Incluye problemas  
resueltos con MATLAB



Consulte la página [www.dextraeditorial.com](http://www.dextraeditorial.com)

Diseño de cubierta: ©TheIdeas · [www.ideasjc.net](http://www.ideasjc.net)

© F. Matía, A. Jiménez, R. Aracil, E. Pinto

© Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica  
Superior de Ingenieros Industriales.  
Universidad Politécnica de Madrid

© Dextra Editorial S.L.  
C/Arroyo de Fontarrón, 271, 28010 Madrid  
Teléfono: 91 773 37 10

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización expresa por escrito de Dextra Editorial S.L.

ISBN: 978-84-16277-04-9  
Depósito legal: M-26698-2014  
Impreso en España. Printed in Spain

## Prólogo

Este libro cubre los contenidos de la materia que con el nombre de Teoría de Sistemas se dan en numerosas Escuelas de Ingeniería. El enfoque dado es el más aplicado a la industria; se estudian los sistemas dinámicos lineales desde un punto de vista físico y se lleva a cabo una introducción a los sistemas de control. Desde este punto de vista, el texto cubre el contenido de lo que se puede entender como un curso de Regulación Automática básica.

El texto nace de la amplia experiencia docente de los autores en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (Universidad politécnica de Madrid) y su lectura no impide el seguir acudiendo a otros libros de consulta. Como el de E. Andrés Puente titulado Regulación Automática I, que fue editado por la sección de publicaciones de la E.T.S.I.I. de la Universidad Politécnica de Madrid.

Tras el amplio seguimiento que tuvo la primera edición la segunda se aprovechó para mejorar el texto en varios aspectos. Por una parte se refinaron detalles de notación y se mejoraron algunas explicaciones. Por otra parte se ampliaron algunos capítulos (destacan especialmente los dedicados a la transformada de Laplace y al lugar de las raíces), y se añadió uno nuevo (el referido a identificación de sistemas).

La tercera edición incorporó como características principales un capítulo dedicado al análisis frecuencial de sistemas y la inclusión de ejercicios resueltos en MATLAB en todos aquellos temas que se prestan a ello. En esta cuarta edición se completa la parte de análisis frecuencial con dos nuevos temas dedicados al trazado de diagramas de Bode y de Nyquist, respectivamente.

Agradecemos todos los comentarios recibidos y seguimos dando la bienvenida a cualquier sugerencia que contribuya a mejorar el texto actual.



## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Teoría de Sistemas . . . . .	1
1.2	La Automática . . . . .	2
1.3	Orígenes de la Regulación Automática . . . . .	4
1.4	Sistemas . . . . .	7
1.5	Fundamentos de los Sistemas de Control . . . . .	9
1.6	Metodología de Resolución . . . . .	11
<b>I</b>	<b>MODELADO</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Señales y Sistemas</b>	<b>21</b>
2.1	Concepto de Señal . . . . .	21
2.2	Señales Continuas Típicas . . . . .	22
2.3	Clasificación de los Sistemas . . . . .	26
2.4	Sistemas Diferenciales Lineales Invariantes . . . . .	31
2.5	Linealización de Sistemas . . . . .	32
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Modelado de Sistemas Físicos</b>	<b>41</b>
3.1	Sistemas Mecánicos . . . . .	41
3.2	Sistemas Eléctricos . . . . .	44
3.3	Sistemas Electromecánicos . . . . .	46
3.4	Sistemas Hidráulicos . . . . .	47
3.5	Sistemas Químicos . . . . .	48
3.6	Sistemas Térmicos . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Transformada de Laplace</b>	<b>51</b>
4.1	Concepto de Transformada . . . . .	51
4.2	Transformada de Laplace de Señales Típicas . . . . .	52
4.3	Propiedades de la Transformada de Laplace . . . . .	57
4.4	Transformada Inversa de Laplace . . . . .	67
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	73

<b>5</b>	<b>Función de Transferencia</b>	<b>77</b>
5.1	Concepto de Función de Transferencia . . . . .	77
5.2	Sistemas Diferenciales Invariantes . . . . .	79
5.3	Diagramas de Bloques . . . . .	83
5.4	Trasposición de Sumadores y Puntos de Bifurcación . . . . .	88
5.5	Impedancia Operacional . . . . .	90
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	94
<b>II</b>	<b>ANÁLISIS</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Análisis Dinámico</b>	<b>101</b>
6.1	Respuesta Temporal . . . . .	101
6.2	Estabilidad . . . . .	103
6.3	Modos Transitorios . . . . .	106
6.4	Respuesta al Escalón Unitario . . . . .	114
6.5	Respuesta a la Rampa Unitaria . . . . .	117
6.6	Respuesta en Frecuencia . . . . .	118
6.7	Respuesta Libre . . . . .	120
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	122
<b>7</b>	<b>Sistemas de Primer Orden</b>	<b>127</b>
7.1	Representación . . . . .	127
7.2	Respuesta Impulsional . . . . .	128
7.3	Respuesta al Escalón Unitario . . . . .	129
7.4	Respuesta a la Rampa Unitaria . . . . .	131
7.5	Influencia de Ceros . . . . .	133
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	136
<b>8</b>	<b>Sistemas de Segundo Orden</b>	<b>139</b>
8.1	Tipos de Raíces . . . . .	139
8.2	Respuesta Impulsional . . . . .	142
8.3	Respuesta al Escalón Unitario . . . . .	145
8.4	Caracterización Dinámica . . . . .	147
8.5	Respuesta a la Rampa Unitaria . . . . .	153
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	155
<b>9</b>	<b>Sistemas de Orden Superior</b>	<b>159</b>
9.1	Influencia de Ceros . . . . .	159
9.2	Influencia de Polos . . . . .	163
9.3	Influencia de Pares Polo-Cero . . . . .	166
9.4	Sistemas de Orden Superior . . . . .	167
9.5	Sistema Reducido Equivalente . . . . .	169
9.6	Retardo Puro . . . . .	176
	Ejercicios con MATLAB . . . . .	179



<b>10 Identificación de Sistemas</b>	<b>185</b>
10.1 El Proceso de Identificación	185
10.2 Métodos basados en Características Temporales	186
10.3 Método de las Medidas Temporales	188
10.4 Métodos de la Tangente	192
10.5 Método de las Áreas	199
10.6 Método de los Momentos	203
<b>III DISEÑO</b>	<b>207</b>
<b>11 Estabilidad</b>	<b>209</b>
11.1 Estabilidad Polinomial	209
11.2 Regla de Cardano-Vietta	210
11.3 Criterio de Routh-Hurwitz	211
11.4 Casos Especiales	213
11.5 Estabilidad en Función de Parámetros	217
11.6 Influencia de Retardos	218
Ejercicios con MATLAB	221
<b>12 Errores en Régimen Permanente</b>	<b>225</b>
12.1 Precisión de Sistemas. Definiciones	225
12.2 Cálculo del Error con Realimentación Constante	228
12.3 Error con Realimentación no Constante	232
12.4 Errores ante Entrada en la Perturbación	236
Ejercicios con MATLAB	239
<b>13 Lugar de las Raíces</b>	<b>245</b>
13.1 Análisis Dinámico de Sistemas Realimentados	245
13.2 Ecuaciones Básicas del Lugar de las Raíces	248
13.3 Reglas para el Trazado del Lugar de las Raíces	253
13.4 Formas Básicas del Lugar de las Raíces	263
13.5 Lugar de las Raíces Generalizado	266
Ejercicios con MATLAB	269
<b>14 Control PID</b>	<b>275</b>
14.1 Diseño de Reguladores	275
14.2 Tipos Básicos de Compensadores	278
14.3 Metodologías de Diseño	282
14.4 Acciones de Control	284
14.5 Regulador PID	290
14.6 Modificaciones al Control PID	292
<b>15 Ajuste de PIDs</b>	<b>295</b>
15.1 Métodos de Ajuste de PIDs	295
15.2 Métodos Empíricos	296
15.3 Métodos Analíticos	300

15.4 Ajuste de Reguladores P . . . . .	302
15.5 Ajuste de Reguladores PI . . . . .	305
15.6 Ajuste de Reguladores PD . . . . .	308
15.7 Ajuste de Reguladores PID . . . . .	311
Ejercicios con MATLAB . . . . .	314
<b>IV FRECUENCIA</b>	<b>317</b>
<b>16 Análisis Frecuencial</b>	<b>319</b>
16.1 Respuesta en Frecuencia . . . . .	319
16.2 Componentes Frecuenciales de una Señal . . . . .	322
16.3 Transformada de Fourier . . . . .	326
16.4 Ecuación Fundamental . . . . .	329
16.5 Representación Gráfica . . . . .	330
16.6 Análisis del Comportamiento de Sistemas . . . . .	337
Ejercicios con MATLAB . . . . .	341
<b>17 Diagramas de Bode</b>	<b>345</b>
17.1 Diagramas Logarítmicos . . . . .	345
17.2 Diagrama de Bode de Funciones Elementales . . . . .	349
17.3 Características de la Respuesta en Frecuencia . . . . .	362
17.4 Trazado General del Diagrama de Bode . . . . .	364
17.5 Sistemas de Fase Mínima . . . . .	367
17.6 Diagramas de Black . . . . .	370
Ejercicios con MATLAB . . . . .	372
<b>18 Diagramas de Nyquist</b>	<b>377</b>
18.1 Principio del Argumento de Cauchy . . . . .	377
18.2 Criterio de Estabilidad de Nyquist . . . . .	380
18.3 Casos Especiales . . . . .	386
18.4 Diagramas de Nyquist de Sistemas Típicos . . . . .	391
18.5 Estabilidad Relativa . . . . .	397
Ejercicios con MATLAB . . . . .	400