



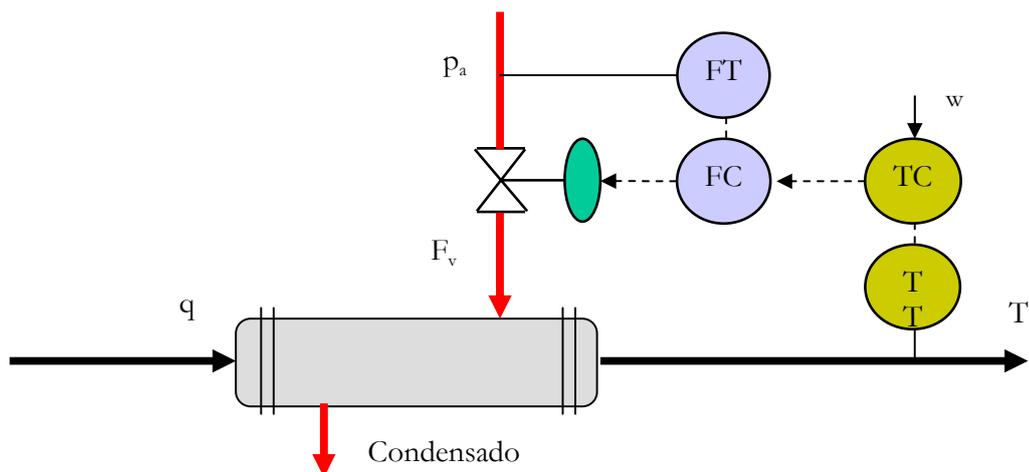
Martínez Bernia  
y Asociados

---

---

TEMAS DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y  
AUTOMÁTICA

## ***REGULACIÓN AUTOMÁTICA***



Francisco Vázquez  
Jorge Jiménez  
Fernando Morilla

---

Editado por:

**Martínez Bernia y Asociados**

☒ López Amo, 10,3º-1,  
14012 CÓRDOBA (SPAIN)

% 957-295862

❗ **Marcas Comerciales:** Las designaciones utilizadas por las empresas para distinguir sus productos suelen ser marcas comerciales. **Martínez Bernia y Asociados** ha intentado que en esta obra se distingan éstas de los términos descriptivos sin intención de infringir la marca y sólo en beneficio del propietario de la misma.

Se ha puesto el máximo empeño en ofrecer una información completa y precisa en esta obra. Sin embargo, el editor no asume ninguna responsabilidad derivada de su utilización, ni tampoco por cualquier violación de patentes o derechos de terceras partes que pudieran derivarse. La venta de esta obra no supone para el editor ninguna forma de asistencia legal, administrativa ni de ningún otro tipo. Ésta debe buscarse en los servicios de un profesional competente.

Según lo dispuesto en el Código Penal vigente ninguna parte de este libro puede ser reproducida, grabada o transmitida en forma alguna ni por cualquier procedimiento, ya sea electrónico, mecánico, reprográfico, magnético o cualquier otro, sin autorización previa y por escrito de **Martínez Bernia y Asociados**.

## CONTENIDO

**Capítulo 1.- Introducción a los Sistemas de Control..... 1**

1.1.- Introducción .....	2
1.2.- Breve revisión histórica de la Automática.....	4
1.3.- Componentes básicos de un Sistema de Control.....	7
1.4.- Clasificación de los sistemas .....	13
1.5.- Ejemplos de control en lazo cerrado.....	16
1.6.- Ciclo de diseño de un Sistema de Control .....	20

**Capítulo 2.- Descripción de Sistemas Continuos ..... 23**

2.1.- Modelos matemáticos .....	24
2.2.- Modelado de Sistemas Dinámicos .....	28
2.2.1.- Modelos matemáticos para sistemas mecánicos.....	28
2.2.2.- Modelos matemáticos para sistemas eléctricos .....	33
2.2.3.- Modelos matemáticos para sistemas electromecánicos .....	34
2.2.4.- Modelos matemáticos para sistemas térmicos.....	36
2.2.5.- Modelos matemáticos para sistemas hidráulicos.....	39
2.3.- La Transformada de Laplace.....	41
2.3.1.- Definición, propiedades y tabla de transformadas .....	42
2.3.2.- La transformada inversa de Laplace.....	52
2.3.3.- Aplicación de la transformada de Laplace a la resolución de ecuaciones diferenciales.....	59
2.4.- La Función de Transferencia.....	64
2.4.1.- Definición.....	64
2.4.2.- Ejemplos .....	65
2.4.3.- Linealización de un modelo matemático no lineal.....	75
2.5.- Diagramas de bloques .....	85
2.5.1.- Definición.....	85
2.5.2.- Álgebra de bloques .....	89
2.5.3.- Ejemplos .....	92

**Capítulo 3.- Respuesta temporal transitoria y estacionaria.... 101**

3.1.- Conceptos básicos .....	102
3.2.- Sistemas de primer orden.....	104
3.2.1.- Respuesta a la función escalón unitario.....	104
3.2.2.- Respuesta a la función rampa .....	106
3.3.- Sistemas de segundo orden .....	107
3.3.1.- Clasificación según la posición de los polos.....	108
3.3.2.- Respuesta a la función escalón.....	111
3.4.- Especificaciones para la respuesta transitoria .....	120
3.4.1.- Caso particular: sistema de segundo orden .....	121
3.5.- Sistemas de orden superior .....	131
3.5.1.- Polos dominantes: reducción de orden.....	132
3.6.- Errores estacionarios.....	139
3.6.1.- Clasificación de los sistemas de control .....	139
3.6.2.- Errores en estado estacionario .....	139

#### **Capítulo 4.- Análisis de estabilidad en el plano complejo ..... 149**

4.1.- Estabilidad en el plano complejo .....	150
4.2.- Criterio de Routh .....	151
4.2.1.- Casos especiales.....	154
4.2.2.- Aplicaciones del Criterio de Routh.....	156
4.3.- El lugar de las raíces .....	159
4.3.1.- Introducción.....	159
4.3.2.- Lugar de las raíces .....	160
4.3.3.- Reglas para la construcción aproximada.....	161
4.3.4.- Lugar de las raíces inverso.....	167
4.3.5.- Ejemplos de aplicación del lugar de las raíces .....	168
4.4.- Contorno de las raíces.....	188

#### **Capítulo 5.- Respuesta en frecuencia ..... 191**

5.1.- Introducción.....	192
5.2.- Diagramas de Bode.....	193
5.2.1.- Introducción.....	194
5.2.2.- Trazado asintótico.....	194

5.2.3.- Sistemas de fase mínima y de fase no mínima .....	207
5.2.4.- Retardo de transporte .....	208
5.2.5.- Determinación de las constantes de error estático .....	210
5.3.- Trazas polares.....	214
5.3.2.- Formas generales de las trazas polares .....	219
5.4.- Criterio de estabilidad de Nyquist .....	222
5.4.1.- Introducción .....	222
5.4.2.- Criterio de Nyquist .....	222
5.4.3.- Aplicaciones del criterio de Nyquist .....	225
5.4.4.- Ejemplos con MATLAB del diagrama de Nyquist .....	233
5.5.- Especificaciones en frecuencia .....	239
5.5.1.- Ancho de banda.....	239
5.5.2.- Pico de resonancia .....	240
5.5.3.- Margen de ganancia.....	240
5.5.4.- Margen de fase.....	241

## **Capítulo 6.- Diseño de controladores ..... 273**

6.1.- Acciones básicas de control .....	274
6.1.1.- Controlador de dos posiciones o de encendido/apagado .....	275
6.1.2.- Controlador proporcional .....	275
6.1.3.- Controlador integral .....	276
6.1.4.- Controlador proporcional-integral .....	277
6.1.5.- Controlador proporcional-derivativo .....	278
6.1.6.- Controlador proporcional-integral-derivativo .....	278
6.2.- Compensación basada en el lugar de las raíces .....	279
6.2.1.- Consideraciones preliminares de diseño .....	279
6.2.2.- Efectos de la adición de polos .....	280
6.2.3.- Efectos de la adición de ceros .....	281
6.2.4.- Análisis de controladores típicos en el lugar de las raíces.....	282
6.2.5.- Controladores electrónicos.....	284
6.2.5.1.- Amplificadores operacionales.....	285
6.2.5.2.- Amplificador inversor.....	286
6.2.5.3.- Obtención de funciones de transferencia mediante el enfoque de impedancias.....	287
6.2.5.4.- Controlador proporcional (P) .....	289

6.2.5.5.- Controlador integral (I).....	290
6.2.5.6.- Controlador proporcional-derivativo (PD).....	291
6.2.5.7.- Controlador proporcional-integral (PI).....	291
6.2.5.8.- Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).....	292
6.2.5.9.- Red de adelanto o de atraso .....	293
6.2.6.- Ejemplos de procedimientos de diseño.....	294
6.2.6.1.- Control P.....	294
6.2.6.2.- Control PI.....	298
6.2.6.3.- Control PD.....	300
6.2.6.4.- Control PID.....	302
6.2.6.5.- Red de adelanto.....	303
6.2.6.6.- Red de retraso .....	304
6.3.- Compensación basada en la respuesta en frecuencia .....	307
6.3.1.- Modificaciones en la respuesta en frecuencia debida a los controladores.....	307
6.3.1.1.- Control P.....	308
6.3.1.2.- Control PI.....	308
6.3.1.3.- Control PD.....	309
6.3.1.4.- Red de adelanto.....	310
6.3.1.5.- Red de retardo.....	311
6.3.2.- Procedimientos de diseño de controladores en el dominio de la frecuencia.....	312