

Christian G. Quintero M.
José A. Oñate López
Jamer R. Jiménez M.

Control automático aplicado

Prácticas de Laboratorio

2^a
EDICIÓN
REVISADA
Y AUMENTADA

UN UNIVERSIDAD
DEL NORTE

Editorial

CONTROL AUTOMÁTICO APLICADO
PRÁCTICAS DE LABORATORIO

CONTROL AUTOMÁTICO APLICADO
PRÁCTICAS DE LABORATORIO



CHRISTIAN G. QUINTERO M.
JOSÉ A. OÑATE LÓPEZ
JAMER R. JIMÉNEZ M.

Área metropolitana
de Barranquilla (COLOMBIA), 2014

UN UNIVERSIDAD
DEL NORTE
Editorial

Quintero M., Christian G.

Control automático aplicado : prácticas de laboratorio / Christian G. Quintero M., José A. Oñate López, Jamer R. Jiménez M. — Barranquilla : Editorial Universidad del Norte, 2ª edición revisada y aumentada, 2014.

xxii, 152 p. : il. ; 28 cm.

Incluye referencias bibliográficas (p. [145])

ISBN 978-958-741-446-2 (impreso) - ISBN 978-958-741-906-1 (PDF)

ISBN 978-958-741-907-8 (ePub)

I. Control automático—Manuales de laboratorio I. Quintero M., Christian G. II. Oñate López, José A. III. Jiménez M., Jamer. IV. Tit.

(629.80287 Q7 22 ed.) (CO-BrUNB)



Vigilada Mineducación

www.uninorte.edu.co

Km 5, vía a Puerto Colombia, A.A. 1569

Área metropolitana de Barranquilla (Colombia)

© 2014, Editorial Universidad del Norte

Christian G. Quintero M., José A. Oñate López y Jamer R. Jiménez M.

Primera edición, mayo de 2011

Segunda edición revisada y aumentada, abril de 2014

Coordinación editorial

Zoila Sotomayor O.

Diseño y diagramación

Munir Kharfan de los Reyes

Álvaro Carrillo Barraza

Diseño de portada

Joaquín Camargo Valle

Corrección de textos

Henry Stein

Impreso y hecho en Colombia

Cadena (Bogotá)

Printed and made in Colombia

© Reservados todos los derechos. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio reprográfico, fónico o informático, así como su transmisión por cualquier medio mecánico o electrónico, fotocopias, microfilm, *offset*, mimeográfico u otros sin autorización previa y escrita de los titulares del copyright. La violación de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

| LOS AUTORES |

CHRISTIAN G. QUINTERO M. Profesor e investigador de tiempo completo del Departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia. Recibió su Ph.D. *Cum Laude* en el programa doctoral en Tecnologías de la Información del Departamento de Electrónica, Informática y Automática de la Universidad de Girona, España (2007). Es Ingeniero *Cum Laude* en Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, Colombia (2001). Miembro del grupo de investigación en Robótica y Sistemas Inteligentes, coordinador de la Maestría en Ingeniería Electrónica y docente de las asignaturas Control Automático, Control y Agentes Inteligentes y Diseño de Sistemas Inteligentes de la Universidad del Norte. Sus intereses en investigación y docencia incluyen el desarrollo de planteamientos de Inteligencia Computacional y Control Automático implementados conjuntamente en diversos dominios de aplicación. Su experiencia en investigación está relacionada con la definición, formulación, negociación, ejecución y evaluación de proyectos tecnológicos y gestión de proyectos de educación en tecnología.

JOSÉ A. OÑATE LÓPEZ. Máster en Ingeniería Electrónica con énfasis en Robótica y Sistemas Inteligentes de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia (2012) e Ingeniero en Electrónica de la misma universidad (2010). Miembro del grupo de investigación en Robótica y Sistemas Inteligentes GIRSI de la Universidad del Norte. Se desempeña como consultor en diferentes empresas de la región aplicando técnicas de inteligencia computacional para la optimización de procesos y toma de decisiones efectivas. Su experiencia en investigación y docencia está relacionada con sistemas robóticos multiagente, sistemas inteligentes de transporte, control automático e instrumentación electrónica.

JAMER JIMÉNEZ MARES. Máster *Cum Laude* en Ingeniería Electrónica con énfasis en Eficiencia Energética y Sistemas Inteligentes de la Universidad del Norte en Barranquilla, Colombia (2013). Ingeniero Electrónico y Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma del Caribe (2009). Miembro del grupo de investigación en Robótica y Sistemas Inteligentes de la Universidad del Norte. Sus principales áreas de interés están relacionadas con el desarrollo de sistemas de gestión para el desarrollo de redes eléctricas inteligentes *Smart Grids*. Su experiencia en investigación y docencia está relacionada con sistemas de gestión inteligente para la eficiencia energética, modelado de datos, predicción y análisis de series de tiempo, control automático e instrumentación electrónica.

| CONTENIDO |

INTRODUCCIÓN XVII

PRÁCTICA DE LABORATORIO I **MODELADO DE SISTEMAS DINÁMICOS**

1. OBJETIVO GENERAL	2
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE	2
4. INTRODUCCIÓN	3
5. PROCEDIMIENTO	5
5.1 Diseño de un sistema de control	5
Requerimientos, 6	
5.2 Modelado de sistemas eléctricos	6
Modelado de un amplificador, 7. Diseño e implemen- tación, 9. Validación del modelo, 9. Modelado de un filtro, 10. Diseño e implementación, 12. Validación del modelo 12.	
6. PROYECTO INTEGRADOR	14
6.1 Requerimientos primera etapa	17

PRÁCTICA DE LABORATORIO II **ANÁLISIS DE LA RESPUESTA TRANSITORIA Y ESTACIONARIA**

1. OBJETIVO GENERAL	20
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE	20
4. INTRODUCCIÓN	21

5. PROCEDIMIENTO . . . . .	.23
5.1 Diseño y análisis de un sistema de primer orden	23
PII Phase loop locked, 23. Integrador de Miller, 24. Oscilador de relajación: Schmitt trigger, 25.	
5.2 Diseño y análisis de un sistema de segundo orden.	27
Control del nivel de azúcar en la sangre, 27. Control de un dispositivo de propulsión a chorro, 29. Control de movimiento de un radiotelescopio,31.	
5.3 Aplicación en Matlab: utilización y análisis de la respuesta transitoria	33
6. PROYECTO INTEGRADOR . . . . .	.35
6.1 Requerimientos segunda etapa	35

PRÁCTICA DE LABORATORIO III
CRITERIO DE ROUTH Y ANÁLISIS DEL LUGAR DE LAS RAÍCES

1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	.40
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	.40
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE . . . . .	.40
4. INTRODUCCIÓN . . . . .	.41
5. PROCEDIMIENTO . . . . .	.43
5.1 Aplicación del criterio de estabilidad de Routh	43
Control de posición de un robot de soldadura, 43. Control de giro de un vehículo con bandas de rodamiento, 45. Control de velocidad de una línea de llenado de botellas, 46.	
5.2 Aplicación del análisis del lugar de las raíces	48
Vehículo robot explorador, 48. Brazo robótico, 49. Piloto automático para un avión, 50.	
5.3 Aplicación en MATLAB: criterio de estabilidad de Routh	51
6. PROYECTO INTEGRADOR . . . . .	.53
6.1 Requerimientos tercera etapa . . . . .	.53

PRÁCTICA DE LABORATORIO IV
ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	.56
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	.56
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE . . . . .	.56
4. INTRODUCCIÓN . . . . .	.57
5. PROCEDIMIENTO. . . . .	.59
5.1 Aplicación del análisis de la respuesta en frecuencia . . . . .	.59
Vehículos autónomos, 59. Exploración no tripulada de planetas, 60. Dispensador automático, 61.	
5.2 Aplicación en Matlab: funciones de transferencia y diagramas de Bode . . . . .	.63
6. PROYECTO INTEGRADOR . . . . .	.65
6.1 Requerimientos cuarta etapa . . . . .	.65

PRÁCTICA DE LABORATORIO V
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL SIMULADO

1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	.68
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	.68
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE . . . . .	.68
4. INTRODUCCIÓN . . . . .	.69
5. PROCEDIMIENTO. . . . .	.72
5.1 Análisis del comportamiento del sistema con un controlador PID . . . . .	.72
5.2 Análisis del comportamiento del sistema con un compensador . . . . .	.73
6. PROYECTO INTEGRADOR . . . . .	.75
6.1 Requerimientos etapa final . . . . .	.75

PRÁCTICA DE LABORATORIO VI
DISEÑO, ANÁLISIS Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	.80
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	.80
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE . . . . .	.80
4. INTRODUCCIÓN . . . . .	.81
5. PROCEDIMIENTO . . . . .	.83
5.1 Análisis de la Planta . . . . .	.84
Modelo de la Planta, 84. Análisis de la Planta en Lazo Abierto, 85. Análisis de la Planta en Lazo Cerrado, 85. Análisis del Sistema ante Perturbaciones, 85.	
5.2 Diseño y Sintonización de Controladores . . . . .	.86
Sintonización Gráfica de Compensadores, 87. Sintonización Automática de PID con Técnicas Clásicas, 87. Sintonización Automática de PID con Métodos Robustos, 88.	
5.2 Implementación y Selección de Controladores . . . . .	.89

PRÁCTICA DE LABORATORIO VII
CONTROL EN CASCADA Y CONTROL ANTICIPATIVO

1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	.92
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	.92
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE . . . . .	.92
4. INTRODUCCIÓN . . . . .	.93
5. PROCEDIMIENTO . . . . .	.95
5.1 Sistemas de Control en Cascada . . . . .	.96
Diseño del Controlador Secundario, 97. Diseño del Controlador Primario, 98.	
5.2 Sistemas de Control Anticipativo . . . . .	.98
Diseño del Controlador Anticipativo, 98. Implementación del Controlador Anticipativo, 99.	
5.3 Comparación de Arquitecturas de Control . . . . .	.99

PRÁCTICA DE LABORATORIO VIII
CONTROL DIFUSO Y CONTROL ADAPTATIVO

1. OBJETIVO GENERAL		102
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS		102
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE		102
4. INTRODUCCIÓN		103
5. PROCEDIMIENTO		105
5.1 Control Difuso . . . . .		.105
Diseño del Sistema de Inferencia, 107. Implementación del Controlador Difuso, 109.		
5.2 Control Adaptativo. . . . .		.109
Sintonización del Controlador Original, 111. Análisis de Variaciones de Parámetros, 111. Generación de Datos de Entrenamiento, 113. Entrenamiento de la Red Neuronal, 113. Implementación del Sistema de Control Adaptativo, 114.		

PRÁCTICA DE LABORATORIO IX
SISTEMAS DE CONTROL MULTIVARIABLE

1. OBJETIVO GENERAL		116
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS		116
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE		116
4. INTRODUCCIÓN		117
5. PROCEDIMIENTO		119
5.1 Análisis del Sistema de Control en Lazo Abierto . . . . .		.121
Respuesta al Escalón en cada Entrada, 121. Nivel de Interacción, 122. Selección de Variables de Control, 122.		
5.2 Análisis del Sistema de Control en Lazo Cerrado. . . . .		.123
Diseño de Controladores, 123. Análisis de Interacción entre Variables, 124. Análisis de Interacción con el Tanque 2, 125.		
5.3 Diseño e Implementación de un Desacoplador . . . . .		.125
Diseño del Desacoplador, 125. Validación del Desacoplador, 125. Implementación del Sistema de Control Desacoplado, 126. Interacción del desacoplador sobre el Tanque 2, 126.		

PRÁCTICA DE LABORATORIO X
SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL

1. OBJETIVO GENERAL		128
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS		128
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE		128
4. INTRODUCCIÓN		129
5. PROCEDIMIENTO		130
5.1 Diseño del Sistema de Control Digital		131
Análisis de la Planta en Lazo Abierto, 132. Selección del Tiempo de Muestreo, 132. Diseño de la Constante de la Planta, 133. Diseño del Controlador PID Digital, 134. Cambios del Tiempo de Muestreo sobre la Acción del Controlador, 134.		

PRÁCTICA DE LABORATORIO XI
CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES

1. OBJETIVO GENERAL		138
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS		138
3. RESULTADOS DE APRENDIZAJE		138
4. INTRODUCCIÓN		139
5. PROCEDIMIENTO		141
5.1 Identificación del Modelo para la Planta		143
5.2 Diseño de un Controlador PID		143
5.3 Implementación del Controlador		144

| LISTA DE FIGURAS |

<i>Figura 1.1.</i>	Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado	3
<i>Figura 1.2.</i>	Pierre-Simon Laplace (1749 - 1837)	3
<i>Figura 1.3.</i>	Diagrama de bloques para el control de glucosa en la sangre	7
<i>Figura 1.4.</i>	Amplificador Colector Común	7
<i>Figura 1.5.</i>	Amplificador Emisor Común	8
<i>Figura 1.6.</i>	Amplificador Base Común	8
<i>Figura 1.7.</i>	Sensor para medir el nivel de glucosa en la sangre	10
<i>Figura 1.8.</i>	Filtro Bessel pasa - bajas de cuarto orden (1kHz)	11
<i>Figura 1.9.</i>	Filtro Butterworth pasa - banda de cuarto orden (1 - 5kHz)	11
<i>Figura 1.10.</i>	Filtro Chebychev pasa - altas de cuarto orden (10kHz)	12
<i>Figura 1.11.</i>	Prototipo del producto final para el Proyecto Integrador	14
<i>Figura 1.12.</i>	Diagrama de bloques de los procesos del Proyecto Integrador	15
<i>Figura 1.13.</i>	Diagrama de bloques del control de profundidad para un robot submarino	16
<i>Figura 1.14.</i>	Diagrama de bloques del control de balanceo de un avión	16
<i>Figura 1.15.</i>	Diagrama de bloques del control de posición de un ascensor	16
<i>Figura 2.1.</i>	Respuesta para sistemas de primero y segundo orden ante una entrada escalón	21
<i>Figura 2.2.</i>	Diagrama de bloques de un PLL	24
<i>Figura 2.3.</i>	Integrador de Miller	25
<i>Figura 2.4.</i>	Amplificador operacional Schmitt Trigger	26
<i>Figura 2.5.</i>	Control del nivel de azúcar en la sangre	28
<i>Figura 2.6.</i>	Control de propulsión a chorro.	30
<i>Figura 2.7.</i>	Control del balanceo de una antena	32
<i>Figura 2.8.</i>	Prototipo del producto final para el Proyecto Integrador	35
<i>Figura 2.9.</i>	Diagrama de bloques de los procesos del Proyecto Integrador	36
<i>Figura 2.10.</i>	Diferentes dinámicas en el control de la orientación de un robot móvil	37

<i>Figura 3.1.</i>	Walter Richard Evans y Edward Routh	41
<i>Figura 3.2.</i>	Diagrama de bloques para el control de posición de la cabeza de soldadura	44
<i>Figura 3.3.</i>	Diagrama de bloques para el control de giro de un vehículo con dos bandas de rodamiento	46
<i>Figura 3.4.</i>	Diagrama de bloques para el control de velocidad de una línea de llenado de botellas	47
<i>Figura 3.5.</i>	Sistema de control para un vehículo robot explorador.	48
<i>Figura 3.6.</i>	Sistema de control para un brazo robótico	50
<i>Figura 3.7.</i>	Sistema de control para el piloto automático de un avión	51
<i>Figura 3.8.</i>	Prototipo del producto final para el Proyecto Integrador	53
<i>Figura 3.9.</i>	Diagrama de bloques de los procesos del Proyecto Integrador	54
<i>Figura 4.1.</i>	Bode y Nyquist.	57
<i>Figura 4.2.</i>	Diagrama de bloques del sistema de control de un sistema <i>Human Steering</i>	59
<i>Figura 4.3.</i>	Diagrama de bloques del sistema de control de una de las patas de un robot hexápodo	61
<i>Figura 4.4.</i>	Diagrama de bloques del sistema de control de posición de un dispensador.	62
<i>Figura 4.5.</i>	Ejemplo del desarrollo de la aplicación computacional	64
<i>Figura 4.6.</i>	Prototipo del producto final para el Proyecto Integrador	65
<i>Figura 4.7.</i>	Diagrama de bloques de los procesos del Proyecto Integrador	66
<i>Figura 5.1.</i>	Diagrama de bloques de los procesos del Proyecto Integrador	69
<i>Figura 5.2.</i>	Ejemplo de una interfaz gráfica utilizada para el análisis de un circuito RLC.	70
<i>Figura 5.3.</i>	Ejemplo de una interfaz gráfica utilizada para el análisis de estabilidad a partir de la respuesta en frecuencia	71
<i>Figura 5.4.</i>	Diagrama de bloques de un controlador PID	72
<i>Figura 5.5.</i>	Requerimientos de la interfaz gráfica del Proyecto Integrador	75
<i>Figura 6.1.</i>	Intercambiador de Calor	83
<i>Figura 6.2.</i>	Respuesta al escalón de la temperatura en el tanque	84
<i>Figura 6.3.</i>	Sistema de control de temperatura en lazo cerrado con perturbaciones	85
<i>Figura 6.4.</i>	Interfaz gráfica de sisotool	86
<i>Figura 6.5.</i>	Diseño gráfico de compensadores mediante sisotool	87
<i>Figura 6.6.</i>	Diseño automático de controladores clásicos usando sisotool.	88

<i>Figura 6.7.</i>	Sintonización automática de controladores PID mediante técnicas robustas usando sisotool	88
<i>Figura 6.8.</i>	Configuración de un controlador PID para el sistema de control	89
<i>Figura 6.9.</i>	Arquitectura del controlador PID	90
<i>Figura 7.1.</i>	Comparación de las diferentes técnicas de control	93
<i>Figura 7.2.</i>	Intercambiador de Calor.	95
<i>Figura 7.3.</i>	Sistema de control de temperatura en lazo cerrado con perturbaciones	95
<i>Figura 7.4.</i>	Respuesta del sistema de control en lazo cerrado ante una perturbación	96
<i>Figura 7.5.</i>	Sistema de control en cascada para el intercambiador de calor	97
<i>Figura 7.6.</i>	Respuesta al escalón de la temperatura en el tanque	97
<i>Figura 7.7.</i>	Diagrama de bloques para el diseño del controlador feedforward	98
<i>Figura 7.8.</i>	Sistema de control anticipativo para el intercambiador de calor	99
<i>Figura 8.1.</i>	Intercambiador de Calor	105
<i>Figura 8.2.</i>	Diagrama de bloques para el sistema de control difuso	106
<i>Figura 8.3.</i>	Configuración del generador de números aleatorios bloque Uniform Random Number y el bloque To Workspace, respectivamente	106
<i>Figura 8.4.</i>	Editor de sistemas difusos de MATLAB	107
<i>Figura 8.5.</i>	Editor de las funciones de membresía	108
<i>Figura 8.6.</i>	Editor de reglas de inferencia	109
<i>Figura 8.7.</i>	Diagrama de bloques de un controlador adaptativo autosintonizable	110
<i>Figura 8.9.</i>	Parámetros de configuración del bloque To File	111
<i>Figura 8.10.</i>	Parámetros de configuración de la función de transferencia del proceso	112
<i>Figura 9.1.</i>	Reactor de Tanque Agitado	117
<i>Figura 9.2.</i>	Diagrama del sistema de dos tanques acoplados	119
<i>Figura 9.3.</i>	Modelo del Tanque 1	120
<i>Figura 9.4.</i>	Modelo del Tanque 2	120

<i>Figura 9.5.</i>	Diagrama de bloques del sistema de dos tanques acoplados en lazo abierto	121
<i>Figura 9.6.</i>	Respuesta del nivel del tanque 1 ante una entrada e escalón en el flujo de agua caliente	122
<i>Figura 9.7.</i>	Diseño de controladores para el control de nivel y temperatura en el tanque 1	123
<i>Figura 9.8.</i>	Análisis de interacción ante los cambios de set-point en la temperatura sobre el nivel del tanque 1 y viceversa	124
<i>Figura 9.9.</i>	Diagrama de bloques del desacoplador a diseñar.	125
<i>Figura 9.10.</i>	Diagrama de bloques para la validación del diseño del desacoplador	126
<i>Figura 9.11.</i>	Sistema de Control del Temperatura y Nivel para el Tanque 1	126
<i>Figura 10.1.</i>	Diagrama de bloques de un sistema de control digital.	129
<i>Figura 10.2.</i>	Esquemático de una máquina de moldeo por inyección	130
<i>Figura 10.3.</i>	Sistema de control para la temperatura del polímero	131
<i>Figura 10.4.</i>	Diagrama en Simulink para el sistema de control digital en lazo cerrado.	131
<i>Figura 10.5.</i>	Configuración del bloque Discrete Transfer Fcn	132
<i>Figura 11.1.</i>	Planta de control de nivel de un tanque	139
<i>Figura 11.2.</i>	Banco de automatización	140
<i>Figura 11.6.</i>	Sistema de control implementado en <i>Simulink</i> para el control de nivel del tanque	143
<i>Figura 11.7.</i>	Arquitectura del controlador PID en el PLC Twido de Schneider.	144