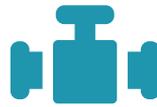


150  
ANIVERSARIO



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



# CONTROL

# DE

# PROCESOS

Oscar Camacho  
Andrés Rosales  
Francklin Rivas

Todo proceso de fabricación y manufactura requiere de un control, la ingeniería de instrumentación y control de procesos tiene una aplicación en el sector productivo.

# CONTROL DE PROCESOS

Primera Edición

Oscar Camacho

Andrés Rosales

Francklin Rivas



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

# Ingeniería en Automatización y Control Industrial

Control de Procesos

Oscar Camacho, Andrés Rosales, Francklin Rivas

Este libro ha seguido el proceso editorial de la Escuela Politécnica Nacional en el que se incluye el proceso de revisión por pares anónimos.

**Comité Editorial:** Jenny Ruales (Editora)  
Marco Calahorrano (Coeditor)  
Cecilia Paredes  
Víctor Hidalgo  
Leonardo Basile

**Técnico Operativo:** Sebastián Laverde

**Diseño de Portadas:** Dirección de Relaciones Institucionales EPN

ISBN: 978-9978-383-57-5

Publicado bajo el sello de EPN Editorial  
Vicerrectorado de Docencia, Escuela Politécnica Nacional  
Ladrón de Guevara E11-253  
Quito-Ecuador

Primera edición, 2020  
Primera impresión, 2020

© Escuela Politécnica Nacional



**Oscar Camacho** recibió el grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes (ULA), Mérida, Venezuela, en 1984. Recibió el MSc. en Ingeniería de Control (ULA), 1992. En 1994 obtuvo un ME en Ingeniería Química y en 1996 un Doctorado en Ciencias de la Ingeniería ambos en University of South Florida (USF), Tampa, Florida (EE.UU.). Desarrollo actividades de postdoctorado en USF en 2001. Se ha desempeñado en docencia e investigación en la ULA y PDVSA (Venezuela), USF (EE. UU.) y actualmente es profesor en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) en Quito, Ecuador. Es editor asociado de ISA Transactions. Ha dirigido más de 40 tesis de grado, maestría y doctorado. Sus líneas de investigación actuales incluyen control por modo deslizante, control de procesos con elevado retardo, control de procesos químicos. Es autor de más de 150 publicaciones en revistas y actas de congresos.

**Andrés Rosales** recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador, en el 2001. En el 2009 obtuvo su Doctorado en Ingeniería de Sistemas de Control. Desde el 2011 es Profesor Titular Principal del Departamento de Automatización y Control Industrial (EPN). Investigador invitado (Universidad de Hannover, Alemania, 2007-2008). Fue Director de Investigación y Proyección Social de la EPN (2015 y 2017). Fue Asesor del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (2010); Primer Secretario de la Embajada del Ecuador en España (2016); Coordinador General Técnico del CEAACES (2014-2015), y Editor de la Revista Politécnica de la EPN (2012-2014). También fue Coordinador de Investigación de la Red Ecuatoriana de Universidades y Escuelas Politécnicas para Investigación y Posgrados REDU (2012-2014 y 2017). Actualmente, es Consejero de la EPN en calidad de Representante de los Profesores.

**Francklin Rivas Echeverría** recibió el título de Ingeniero de Sistemas de la Universidad de Los Andes (ULA) en 1993. Recibió el grado de Magister Scientiae en Ingeniería de Control en 1996, el Grado de Doctor en Ciencias Aplicadas en 2000 y el título de Abogado (Distinción Cum Laude) en 2017. Es Académico del Departamento de Informática de la Universidad Técnica Federico Santa María, Profesor Titular Jubilado de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Los Andes. Docente de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra e Investigador Prometeo (Ecuador). Ha sido Profesor invitado en varias universidades de diversos países, Presidente de consorcios internacionales y editor o miembro de consejos editoriales de varias revistas. Asesor de la Organización de las Naciones Unidas, Kuwait Oil Company, Halliburton, entre otros. Ha dirigido más de 80 Proyectos o tesis de grado a nivel de licenciatura, maestría y doctorado. Ha publicado más de 280 trabajos en revistas, memorias de congresos y capítulos de libro. Coautor o editor de 14 libros. Reconocimiento entregado por la Empresa Halliburton por “contribuciones y dedicación al desarrollo de la Tecnología petrolera”. Reconocimiento por la Revista Internacional “Gerente” por estar entre los 100 Gerentes Venezolanos más exitosos.

# Dedicatoria

A mi bella esposa, Samaria, mis hijos Oscar y Pablo, mi padre Liborio (QEPD), mi madre Consuelo y a mis hermanos; gracias a todos por estar en mi vida y ser mi más grande inspiración.

*Oscar Camacho*

A mis hijos Rafael y Daniel quienes son la luz de mi vida, a mi amada Ana María quien es mi inspiración para día a día seguir adelante.

*Andrés Rosales*

A mi esposa Gaby, a mis hijos Francklin y Paola y a mi hermanita Mónica por ser una fuente de inspiración constante y un motivo maravilloso para trabajar, luchar y buscar mejorar cada día.

*Francklin Rivas*



# Prefacio

Este libro es el fruto de años de trabajo en el área de Control de Procesos y busca proveer de bases teóricas fundamentales en esta importante área del conocimiento, con énfasis en temas que son útiles tanto para estudiantes, profesionales y especialistas. Se presentan, además diversas aplicaciones y directrices sobre su utilización práctica y enfoques sencillos para resolver problemas de ingeniería con el rigor de diversas herramientas matemáticas.

El libro está compuesto por diez capítulos: en el primero se abordan aspectos conceptuales, necesarios para el entendimiento del resto del texto; el segundo presenta aspectos básicos de modelado de procesos; el tercero está relacionado con los controladores PID; el cuarto se refiere a la sintonización de los controladores PID; el quinto describe los esquemas de control para rechazo de perturbaciones; en el sexto se muestran esquemas de control para la compensación de sistemas de fase no mínima, básicamente sistemas con retardo y sistemas con respuesta inversa; en el séptimo se hace una presentación sobre los sistemas multivariables; el octavo describe de una manera sucinta los controladores predictivos basados en modelos; el noveno hace una presentación de técnicas computacionales y optimización inteligente; y, finalmente en el décimo describe una propuesta de control por modos deslizantes que puede ser usada para procesos químicos.

Al final de cada capítulo, se agrega una breve biografía de algunos personajes que han realizado aportes en el área de Control de Procesos, como un homenaje para quienes por su dedicación, contribuyeron al avance en lo académico e industrial en este campo.

Los antecedentes de este libro están relacionados con los estudiantes de los cursos de Control de Procesos de la Maestría en Automatización y Control de la Universidad de los Andes, Mérida (Venezuela), como unas notas para nuestros cursos de postgrado. Luego, estos apuntes pasaron a los ingenieros de Petróleos de Venezuela (PDVSA) con quienes tuvimos la fortuna de compartir y enriquecer los contenidos basados en sus experiencias. Asimismo, nos complace reconocer los útiles comentarios, sugerencias y revisiones proporcionadas por varios colegas y alumnos, especialmente los estudiantes de los cursos de Control de Procesos y Síntesis de Plantas de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador. Los errores u omisiones en este documento siguen siendo nuestra responsabilidad.

Finalmente, el reconocimiento a la Universidad de Los Andes, lugar donde se inició este trabajo, así como al programa Prometeo de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (SENACYT) - Ecuador, institución que posibilitó llegar a este hermoso país y asentarnos en estas bellas tierras. Una mención aparte para los compañeros del Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la EPN, con quienes hemos conformado un gran equipo de trabajo.

Para la edición inicial de este libro se contó con la participación y el esfuerzo de muchas personas, el agradecimiento especial a los ingenieros Juan Villacrés y Michelle Viscaíno; al

Ing. Francisco Ulloa Herrera, quien aportó con el diseño didáctico de los diferentes gráficos, verificación de ecuaciones, corrección de contenidos y edición final.

Cada día damos gracias a Dios por permitirnos desarrollar esta actividad, la docencia, y de esta manera estar presentes en la formación de futuros profesionales responsables y éticamente comprometidos con los destinos de nuestros pueblos.

**Oscar Camacho**, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

**Andrés Rosales**, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

**Francklin Rivas**, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

---

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. Conceptos Generales</b>	<b>4</b>
1.1. Introducción	4
1.2. Variables	5
1.2.1. Variables Manipuladas	7
1.2.2. Variables Controladas	7
1.2.3. Variables No Controladas	7
1.2.4. Perturbaciones	8
1.3. Componentes Básicos de un Sistema de Control	8
1.3.1. Elemento Primario de Medida (Transductores o Sensores)	8
1.3.2. Transmisores	10
1.3.3. Estación Manual	10
1.3.4. Controlador	10
1.3.5. Elemento Final de Control	10
1.3.6. Válvula de Control	11
1.4. Selección y diseño de los esquemas de control	13
1.5. Parámetros característicos de un proceso	14
1.5.1. Ganancia del Proceso ( $K$ )	14
1.5.2. Constante de Tiempo del Proceso ( $\tau$ )	16
1.5.3. Tiempo Muerto ( $t_0$ )	16
1.6. Control Realimentado	16
1.7. Control por Acción Precalculada (Feed Forward)	19
1.8. Otras técnicas de Control Moderno	20
1.8.1. Control Robusto	20
1.8.2. Control Adaptativo	21
1.8.3. Control Óptimo	22
1.9. Linealización y variables de desviación	23
1.9.1. Variable de desviación	23
1.9.2. Linealización aproximada	24
1.9.3. Linealización de funciones con dos o más variables	26
1.9.4. Transformada de Laplace	27

1.10. Tipos de Procesos . . . . .	28
1.10.1. Procesos Auto regulables . . . . .	28
1.10.2. Procesos no Autoregulables . . . . .	29
1.11. Funciones de Transferencia . . . . .	29
1.12. Estabilidad del lazo de control . . . . .	31
1.12.1. Criterio de estabilidad . . . . .	32
1.12.2. El criterio general de estabilidad . . . . .	33
1.12.3. Prueba de Routh-Hurwitz . . . . .	35
1.12.4. Método por Sustitución Directa . . . . .	38
1.13. Resumen . . . . .	39
1.14. Autoevaluación . . . . .	39
<b>2. Conceptos Básicos de Modelado de Procesos . . . . .</b>	<b>45</b>
2.1. Introducción . . . . .	45
2.2. Formulación del Modelo . . . . .	46
2.2.1. Balance global de materia . . . . .	46
2.2.2. Balance de materia por componente . . . . .	46
2.2.3. Balance de energía . . . . .	47
2.3. Ecuaciones constitutivas . . . . .	47
2.3.1. Ley de los Gases . . . . .	47
2.3.2. Reacciones Químicas . . . . .	48
2.3.3. Relaciones de Equilibrio . . . . .	48
2.3.4. Transferencia de calor . . . . .	48
2.3.5. Válvulas de flujo . . . . .	49
2.4. Ejemplos sencillos de procesos industriales . . . . .	50
2.4.1. Nivel en tanque . . . . .	50
2.4.2. Reactor Químico Isotermo . . . . .	52
2.4.3. Cilindro de Gas Agitado . . . . .	54
2.5. Balances de Energía . . . . .	55
2.6. Balance de energía en sistemas cerrados . . . . .	56
2.7. Balance de energía en sistemas abiertos en estado estacionario . . . . .	58
2.7.1. Trabajo de Flujo y Trabajo en el Eje . . . . .	58
2.7.2. Propiedades específicas y entalpía . . . . .	59
2.8. Caso de estudio 1: Reactor con tanque de precalentamiento de alimentación . . . . .	62
2.9. Reactor - Separador - Sistema de reciclaje para Producción de propilenglico . . . . .	67
2.10. Resumen . . . . .	71
2.11. Autoevaluación . . . . .	71
<b>3. Controladores PID . . . . .</b>	<b>76</b>
3.1. Introducción . . . . .	76
3.2. Modo de Control Proporcional . . . . .	78
3.3. Aplicación de un Controlador Tipo P a un Proceso de Primer Orden . . . . .	80
3.3.1. Aplicación de un Controlador Tipo P para Procesos de Segundo Orden . . . . .	84
3.4. Control Proporcional + Integral (PI) . . . . .	87
3.5. Modo de Control Proporcional + Derivativo (PD) . . . . .	92

3.6. Modo de Control Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	95
3.7. Recomendaciones para procesos	97
3.7.1. Lazos control de flujo	97
3.7.2. Lazos de control de nivel	97
3.7.3. Lazos de control de presión	97
3.7.4. Lazos de control de temperatura	98
3.8. Estructuras de controladores	98
3.8.1. Arquitectura PID "ideal o paralelo"	98
3.8.2. Estructura Clásica de PID o forma serie	99
3.8.3. Estructura con dos grados de libertad, (DOFC)	99
3.9. Efecto Wind-up	100
3.10. Acción de los controladores	102
3.11. Resumen	103
3.12. Autoevaluación	103
<b>4. Sintonización de Controladores</b>	<b>107</b>
4.1. Introducción	107
4.2. Método de Lazo Cerrado o Ganancia Última (Método de Ziegler - Nichols)	108
4.3. Método a Lazo Abierto o Curva de Reacción	110
4.3.1. Método de Ziegler - Nichols a lazo abierto	112
4.3.2. Método de Dahlin	113
4.4. Aplicación a un Intercambiador de Calor	113
4.5. Ajuste Mediante Criterios de Minimización de Índices de Funcionamiento	115
4.5.1. Integral del valor absoluto del error (IAE)	116
4.5.2. Integral del cuadrado del error (ICE)	116
4.5.3. Integral del valor absoluto del error ponderado en tiempo (IAET)	117
4.5.4. Integral del cuadrado del error ponderado en tiempo (ICET)	117
4.6. Tanque de agitación continua	118
4.6.1. Consideraciones del proceso:	119
4.6.2. Valores en régimen estacionario:	119
4.6.3. Resultados de simulación	120
4.7. Ecuaciones de sintonización para procesos representados por modelos POMTM	125
4.8. Consideraciones finales	127
4.9. Resumen	128
4.10. Autoevaluación	129
<b>5. Técnicas Avanzadas de control</b>	<b>133</b>
5.1. Introducción	133
5.2. Control en Cascada	134
5.2.1. Cuándo usar y Criterios para diseñar Control en Cascada	136
5.2.2. Ajuste del controlador	138
5.2.3. Implementación	138
5.3. Control por Acción Precalculada	149
5.3.1. Diseño por acción precalculada	149
5.3.2. Criterios para diseñar el controlador	151

5.3.3. Ajuste del controlador	152
5.3.4. Ejemplo de aplicación de control por acción precalculada	152
5.4. Control por Relación	158
5.5. Control Selectivo	171
5.6. Resumen	173
5.7. Autoevaluación	173
<b>6. Compensación de Sistemas de Fase No Mínima</b>	<b>177</b>
6.1. Introducción	177
6.2. Sistemas con Retardo o Tiempo Muerto	177
6.3. Algunos conceptos básicos	178
6.4. Tiempo muerto y aproximaciones	180
6.5. Efecto del tiempo muerto sobre la estabilidad del proceso	182
6.5.1. Caso con el transmisor original, sin retardo o tiempo muerto igual a cero	182
6.5.2. Caso con el transmisor ubicado distante del proceso, retardo incrementado	183
6.6. Diseño del controlador basado en la estructura de Modelo Interno (IMC)	183
6.6.1. Procedimiento de diseño del controlador	185
6.7. Predictor de Smith	186
6.8. Sintonización del controlador en el esquema Predictor de Smith	189
6.8.1. Síntesis de Controladores	189
6.9. Sistemas con respuesta inversa	193
6.10. Modelado Empírico	200
6.10.1. Aproximación a un modelo POMTM	200
6.10.2. Aproximación por modelos de segundo orden con respuesta inversa	202
6.11. Compensador de Iinoya y Alpeten	205
6.11.1. Diseño del compensador considerando un modelo de POMTM	206
6.11.2. El efecto de $\lambda$ sobre la dinámica del proceso.	208
6.11.3. Sintonización	212
6.12. Resumen	213
6.13. Autoevaluación	214
<b>7. Sistemas Multivariables</b>	<b>220</b>
7.1. Introducción	220
7.2. Enfoques de Control	221
7.2.1. Control descentralizado o control diagonal	221
7.2.2. Control Centralizado	223
7.3. Interacción y apareamiento de variables	225
7.3.1. Análisis de diagrama de bloques	226
7.4. Método de Bristo	231
7.5. Diseño de desacopladores: reducción de la interacción	237
7.6. Estrategias para reducir interacción	248
7.7. Sintonización de controladores tipo PID	248
7.8. Retardos Múltiples	249
7.9. RGA para sistemas no cuadrados	251
7.10. Sensibilidad y el RGA	253

7.11. Análisis de valor singular . . . . .	254
7.12. Resumen . . . . .	257
7.13. Autoevaluación . . . . .	257
<b>8. Control Predictivo Basado en Modelo</b>	<b>261</b>
8.1. Introducción . . . . .	261
8.2. Elementos Básicos del MPC	262
8.2.1. Modelo de predicción . . . . .	262
8.2.2. Función objetivo o de costo . . . . .	264
8.2.3. Referencia Futura . . . . .	265
8.2.4. Obtención de la Ley de Control . . . . .	265
8.3. Estrategia de Horizonte Deslizante . . . . .	265
8.4. Control basado en Modelo Algorítmico (MAC) . . . . .	265
8.5. Control basado en la Matriz Dinámica (DMC) . . . . .	269
8.6. Control Predictivo Generalizado (GPC) . . . . .	270
8.6.1. Formulación . . . . .	270
8.6.2. GPC con restricciones . . . . .	273
8.7. Control Predictivo Funcional (PFC) . . . . .	275
8.8. Control Auto - Adaptativo de predicción extendida . . . . .	275
8.9. Control adaptativo de horizonte extendido . . . . .	275
8.10. Recomendaciones para controladores predictivos . . . . .	276
8.11. Resumen . . . . .	277
8.12. Autoevaluación . . . . .	277
<b>9. Técnicas Emergentes y Optimización Inteligente</b>	<b>281</b>
9.1. Introducción . . . . .	281
9.2. Redes neuronales artificiales . . . . .	281
9.2.1. Forma y estructura de las redes neuronales . . . . .	282
9.2.2. Aplicaciones en control . . . . .	284
9.3. Lógica Difusa . . . . .	285
9.3.1. Función de Membresía . . . . .	286
9.3.2. Valores Lingüísticos . . . . .	287
9.3.3. Mecanismos de Razonamiento para Modelos Lingüísticos . . . . .	287
9.3.4. Mecanismos de Difusificación y Desfusificación . . . . .	288
9.4. Algoritmos Genéticos . . . . .	290
9.5. Máquina de Soporte Vectorial . . . . .	293
9.6. Optimización basada en Enjambre de Partículas . . . . .	294
9.7. Sistemas Inmunológicos Artificiales . . . . .	295
9.8. Optimización usando Colonia de Hormigas . . . . .	296
9.9. Técnica de Forraje de bacterias . . . . .	297
9.9.1. Función de optimización del forraje bacteriana . . . . .	298
9.10. Resumen . . . . .	299
9.11. Autoevaluación . . . . .	299

---

<b>10. Control por Modo Deslizante</b>	<b>305</b>
10.1. Introducción . . . . .	305
10.2. Modelo del proceso . . . . .	307
10.3. Estabilidad en el sentido de Lyapunov . . . . .	308
10.3.1. Método Directo de Lyapunov . . . . .	309
10.4. Conceptos básicos del Control Por Modo Deslizante . . . . .	310
10.5. DCMD basado en la Aproximación de Primer Orden de la Serie de Taylor . . . . .	317
10.6. Implementación CMD usando algoritmo tipo PID . . . . .	319
10.7. Simulación del controlador por Modo Deslizante . . . . .	321
10.7.1. Tanque de mezclado . . . . .	321
10.7.2. Reactor CSTR . . . . .	326
10.8. Resumen . . . . .	333
10.9. Autoevaluación . . . . .	334

# CONTROL DE PROCESOS

Oscar Camacho | Andrés Rosales | Francklin Rivas

El libro es un aporte valioso al área de control de procesos, cubre una amplia gama desde temas introductorios hasta temas de control avanzado. Es un libro que es muy fácil de leer, con los temas explicados en forma muy sencilla pero sin resignar profundidad en los conceptos. En el final de cada capítulo hay una sección de autoevaluación que sirve para afianzar los temas tratados. Estoy seguro que será un libro de referencia y consulta permanente. Esta obra puede ser utilizada como base para cursos de grado y también cursos de posgrado. El libro tiene sugerencias prácticas y es muy recomendable para profesionales/ingenieros de procesos de campo.

**Dr. Gustavo Scaglia - CONICET - UNSJ - ARGENTINA.**

ISBN: 978-9978-383-57-5



**EPN**  
editorial

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**