

Índice analítico

1. Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Definiciones en control.....	3
1.2.1 Campo de medida.....	4
1.2.2 Alcance.....	4
1.2.3 Error.....	5
1.2.4 Incertidumbre de la medida.....	6
1.2.5 Exactitud.....	14
1.2.6 Precisión.....	16
1.2.7 Zona muerta.....	16
1.2.8 Sensibilidad.....	16
1.2.9 Repetibilidad.....	16
1.2.10 Histéresis.....	17
1.2.11 Otros términos.....	18
1.2.12 Ejemplos generales de características de instrumentos.....	20
1.3 Clases de instrumentos.....	21
1.3.1 En función del instrumento.....	22
1.3.2 En función de la variable de proceso.....	26
1.3.3 Código de identificación de los instrumentos.....	26
2. Transmisores	63
2.1 Generalidades.....	63
2.2 Transmisores neumáticos.....	64
2.3 Transmisores electrónicos.....	65
2.4 Transmisores digitales.....	66
2.4.1 Transmisor inteligente capacitivo.....	67
2.4.2 Transmisor inteligente piezoresistivo.....	67
2.4.3 Ventajas e inconvenientes.....	68
2.5 Transmisión de señales por radio.....	71
2.6 Comunicaciones.....	72
2.6.1 Protocolos serie.....	72
2.6.2 Protocolos híbridos.....	74
2.6.3 Protocolos abiertos.....	76
2.7 Tabla comparativa de transmisores.....	88
3. Medidas de presión	91
3.1 Unidades y clases de presión.....	91
3.2 Elementos mecánicos.....	92

3.3 Elementos electromecánicos.....	96
3.4 Elementos electrónicos de vacío.....	100
4. Medidas de caudal.....	105
4.1 Medidores volumétricos.....	106
4.1.1 Instrumentos de presión diferencial.....	106
4.1.2 Área variable (rotámetros).....	143
4.1.3 Velocidad.....	153
4.1.4 Fuerza (medidor de placa).....	161
4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético).....	162
4.1.6 Desplazamiento positivo.....	175
4.1.7 Remolino y vórtex.....	179
4.2 Medidores de caudal masa.....	182
4.2.1 Medidores volumétricos compensados.....	182
4.2.2 Medidores térmicos de caudal.....	185
4.2.3 Anemómetro de hilo caliente.....	186
4.2.4 Medidor de Coriolis.....	189
4.3 Comparación de características de los medidores de caudal.....	193
5. Medición de nivel.....	195
5.1 Medidores de nivel de líquidos.....	195
5.1.1 Instrumentos de medida directa.....	196
5.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática.....	200
5.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento.....	208
5.1.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido.....	211
5.1.5 Medidor de nivel de ultrasonidos.....	215
5.1.6 Medidor de nivel de radar o microondas.....	217
5.1.7 Medidor de nivel de radiación.....	220
5.1.8 Medidor de nivel láser.....	223
5.1.9 Otros fenómenos.....	224
5.1.10 Medidor másico de nivel.....	225
5.2 Medidores de nivel de sólidos.....	226
5.2.1 Detectores de nivel de punto fijo.....	228
5.2.2 Detectores de nivel continuos.....	230
6. Medida de temperaturas.....	235
6.1 Introducción.....	235
6.2 Termómetro de vidrio.....	236
6.3 Termómetro bimetalico.....	236
6.4 Termómetros de bulbo y capilar.....	237
6.5 Termómetros de resistencia.....	240
6.6 Termistores.....	251
6.7 Sensores de temperatura de semiconductor.....	253
6.8 Termopares.....	254

6.8.1 Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	254
6.8.2 Compensación de la unión fría.....	294
6.8.3 Circuitos galvanométrico, potenciómetrico y digital.....	295
6.8.4 Verificación de un instrumento y de un termopar	297
6.8.5 Normas técnicas	298
6.9 Pirómetros de radiación	299
6.9.1 Pirómetros ópticos de desaparición de filamento	302
6.9.2 Pirómetro de infrarrojos.....	302
6.9.3 Pirómetro fotoeléctrico	303
6.9.4 Pirómetro de dos colores	305
6.9.5 Pirómetro de radiación total.....	306
6.9.6 Otros fenómenos	309
6.10 Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura.....	310
6.11 Tabla comparativa de características.....	314

7. Otras variables.....317

7.1 Variables físicas	317
7.1.1 Peso.....	317
7.1.2 Velocidad.....	323
7.1.3 Densidad y peso específico.....	326
7.1.4 Humedad y punto de rocío.....	338
7.1.5 Viscosidad y consistencia	351
7.1.6 Llama	359
7.1.7 Oxígeno disuelto.....	364
7.1.8 Turbidez	366
7.1.9 Intensidad de radiación solar.....	367
7.2 Variables químicas	368
7.2.1 Conductividad en medio líquido.....	368
7.2.2 pH.....	370
7.2.3 Redox (potencial de oxidación-reducción)	374
7.2.4 Concentración de gases	376

8. Elementos finales de control381

8.1 Válvulas de control.....	381
8.1.1 Generalidades.....	381
8.1.2 Tipos de válvulas	382
8.1.3 Cuerpo de la válvula.....	388
8.1.4 Tapa de la válvula o casquete.....	390
8.1.5 Partes internas de la válvula. Obturador y asientos.....	395
8.1.6 Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales	396
8.1.7 Características de la válvula.....	402
8.1.8 Servomotores	414
8.1.9 Accesorios.....	435
8.1.10 Válvula inteligente	446

8.1.11 Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes C_v y K_v	447
8.1.12 Ruido en las válvulas de control.....	485
8.2 Otros elementos finales de control.....	493
8.2.1 Rectificadores controlados de silicio	493
8.2.2 Bombas dosificadoras	496
8.2.3 Actuadores de velocidad variable.....	497
8.2.4 Elementos finales varios	497
9. Regulación automática	499
9.1 Introducción.....	499
9.2 Características del proceso	499
9.3 Tipos de control.....	504
9.3.1 Control todo-nada.....	504
9.3.2 Control flotante	506
9.3.3 Control proporcional de tiempo variable	506
9.3.4 Control proporcional	507
9.3.5 Control proporcional + integral.....	510
9.3.6 Control proporcional + derivado.....	512
9.3.7 Control proporcional + integral + derivado.....	514
9.4 Controladores neumáticos	515
9.5 Controladores electrónicos	516
9.5.1 Controlador todo-nada.....	517
9.5.2 Control proporcional de tiempo variable	518
9.5.3 Control proporcional.....	518
9.5.4 Control proporcional + integral.....	519
9.5.5 Control proporcional + derivado.....	520
9.5.6 Control proporcional + integral + derivado.....	521
9.6 Controladores digitales	522
9.6.1 Componentes	522
9.6.2 Algoritmos.....	524
9.6.3 Controlador digital universal.....	527
9.7 Selección del sistema de control	529
9.8 Criterios de estabilidad en el control	530
9.9 Métodos de ajuste de controladores	532
9.10 Otros tipos de control	545
9.10.1 Generalidades.....	545
9.10.2 Control en cascada	546
9.10.3 Programadores.....	550
9.10.4 Control de relación.....	551
9.10.5 Control anticipativo	552
9.10.6 Control de gama partida	555
9.10.7 Control selectivo.....	556
9.10.8 Control de procesos discontinuos	557
9.10.9 Controladores no lineales	559

9.10.10 Instrumentos auxiliares	561
9.11 Seguridad intrínseca y funcional.....	563
9.11.1 Introducción.....	563
9.11.2 Nivel de energía de seguridad y mecanismos de la ignición	564
9.11.3 Clasificaciones de áreas peligrosas.....	567
9.11.4 Normas	568
9.11.5 Barreras Zener	569
9.11.6 Barreras galvánicas	571
9.11.7 Factores de seguridad	571
9.11.8 Seguridad funcional de los instrumentos.....	572
9.12 Control por ordenador	576
9.12.1 Generalidades.....	576
9.12.2 Control DDC	579
9.12.3 Control supervisor (SPC).....	581
9.12.4 Control distribuido (DCS).....	583
9.13 Sistemas de control avanzado.....	590
9.13.1 Generalidades.....	590
9.13.2 Correctores	595
9.13.3 Control robusto	597
9.13.4 Control linealizador global	598
9.13.5 Control estadístico del proceso (SPC).....	599
9.13.6 Control multivariable	602
9.13.7 Control óptimo	603
9.13.8 Control adaptativo.....	606
9.13.9 Control predictivo	610
9.13.10 Sistemas expertos	613
9.13.11 Control por redes neuronales.....	615
9.13.12 Control por lógica difusa	619
9.14 Control integrado	623
9.14.1 Generalidades.....	623
9.14.2 Sistema de control básico, control distribuido y control avanzado	625
9.14.3 Gestión de alarmas.....	627
9.14.4 Sistema de gestión de laboratorio	628
9.14.5 Sistema de gestión de la producción	629
9.14.6 Red de comunicaciones	629
9.14.7 Sistema de gestión de seguridad de la planta	633
9.14.8 Sistema de gestión de la calidad (ISO 9000:2000).....	634
9.14.9 Estándar OPC de intercambio de datos de proceso.....	636
9.14.10 Gestión de calibraciones	638
10. Calibración de los instrumentos	643
10.1 Generalidades.....	643
10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración.....	644
10.3 Calibración de instrumentos de presión, caudal y nivel	647

10.3.1 Presión	647
10.3.2 Caudal.....	650
10.3.3 Nivel	652
10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	653
10.4.1 Pirómetros de radiación	656
10.4.2 Transmisores de temperatura inteligentes	656
10.4.3 Calibradores universales de temperatura	657
10.5 Calibración de válvulas de control	657
10.6 Calibración de instrumentos digitales.....	660
10.6.1 Controlador universal o multifunción.....	660
10.6.2 Resto de instrumentos de la planta.....	661
10.7 Mantenimiento de instrumentos.....	662
10.8 Normativa de calidad ISO 9000:2000 aplicada a la instrumentación.....	666
10.8.1 ISO 9001.....	667
11. Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control	671
11.1 Generalidades.....	671
11.2 Calderas de vapor	671
11.2.1 Generalidades.....	671
11.2.2 Control de combustión.....	672
11.2.3 Control de nivel	675
11.2.4 Seguridad de llama	677
11.3 Secaderos y evaporadores	678
11.4 Horno túnel	680
11.5 Columnas de destilación	681
11.6 Intercambiadores de calor	683
11.7 Control del reactor en una central nuclear	685
Apéndice A. Análisis dinámico de los instrumentos.....	689
A.1 Generalidades	689
A.2 Funciones elementales de excitación	695
A.2.1 Escalón unidad $u(t)$	695
A.2.2 Impulso unidad	695
A.2.3 Respuesta impulsional.....	695
A.2.4 Respuesta indicial	696
A.2.5 Respuesta ante una entrada en rampa	696
A.2.6 Respuesta ante una entrada senoidal	698
A.3 Análisis dinámico de los transmisores	702
A.3.1 Elementos fundamentales.....	702
A.3.2 Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	702
A.4 Análisis dinámico de los controladores	705
A.4.1 Introducción	705

A.4.2 Acción proporcional	706
A.4.3 Acción proporcional + integral.....	711
A.4.4 Acción proporcional + derivada	713
A.4.5 Acción proporcional + integral + derivada.....	715
A.4.6 Control PID en el diagrama de Nyquist	718
A.4.7 Ensayo de controladores	719
A.5 Iniciación a la optimización de procesos	722
A.5.1 Generalidades	722
A.5.2 Análisis experimental del proceso	722
A.5.3 Estabilidad	724
A.5.4 Criterios de ajuste en el diagrama de Bode.....	725
A.5.5 Criterios de ajuste en el diagrama de Nyquist.....	729
A.5.6 Ábaco de Nichols y curva de desviación	736
Apéndice B. Evolución de la instrumentación.....	741
B.1 Inicios - Instrumentos locales y neumáticos.....	741
B.2 Instrumentos electrónicos - Convencionales y de alta densidad	742
B.3 Computadores	744
B.4 Control distribuido.....	746
B.5 Control avanzado y transmisores inteligentes.....	748
B.6 Ergonomía.....	748
B.7 Comunicaciones	749
B.8 Futuro	750
Glosario.....	755
Bibliografía	767