

Prólogo a la séptima edición	XVII
Prólogo	XVIII

Capítulo 1

Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	3
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud (<i>accuracy</i>)	7
1.2.6 Precisión	9
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	9
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	9
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	10
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	11
1.2.11 Otros términos	11
1.2.12 Ejemplos generales de características de instrumentos	13
1.3 Clases de instrumentos	14
1.3.1 En función del instrumento	15
1.3.2 En función de la variable de proceso	21
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	21
1.3.3.1 Resumen norma ISA-S5.1-84 (R 1992)	22
1.3.3.2 Resumen norma ISA-S5.2-76 (R 1992)	46
1.3.3.3 Resumen norma ISA-S5.3-1983	50
1.3.3.4 Resumen norma ISA-S5.4-1991	55
1.3.3.5 Resumen norma ISA-S5.5-1985	57
1.3.3.6 Normas DIN e ISO	58

Capítulo 2

Transmisores	61
2.1 Generalidades	61
2.2 Transmisores neumáticos	62
2.3 Transmisores electrónicos	63
2.4 Transmisores digitales	64
2.4.1 Ventajas e inconvenientes	66
2.5 Comunicaciones	69
2.6 Tabla comparativa de transmisores	85

Capítulo 3

Medidas de presión	89
3.1 Unidades y clases de presión	89
3.2 Elementos mecánicos	91
3.3 Elementos electromecánicos	95
3.4 Elementos electrónicos de vacío	100

Capítulo 4

Medidas de caudal	103
4.1 Medidores volumétricos	104
4.1.1 Instrumentos de presión diferencial	104
4.1.1.1 Fórmula general	104
4.1.1.2 Elementos de presión diferencial	116
4.1.1.3 Resumen de las normas ISO 5167-1980	119
4.1.1.4 Tubo Pitot	137
4.1.1.5 Tubo Annubar	138
4.1.1.6 Transmisores de fuelle y de diafragma	139
4.1.1.7 Integradores	143
4.1.2 Área variable (rotámetros)	143
4.1.3 Velocidad	153
4.1.3.1 Vertederos y Venturi	153
4.1.3.2 Transductores ultrasónicos	157
4.1.4 Fuerza (medidor de placa)	159
4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético)	160
4.1.5.1 Medidor magnético de caudal	160
4.1.6 Desplazamiento positivo	173
4.1.6.1 Medidor de disco oscilante	174
4.1.6.2 Medidor de pistón oscilante	174
4.1.6.3 Medidor de pistón alternativo	175
4.1.6.4 Medidor rotativo	176
4.1.6.5 Accesorios	178
4.1.7 Remolino y vórtex	178
4.1.8 Oscilante	180
4.1.9 Medidor láser	181
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 Medidores de momento angular	186
4.2.4 Medidor de Coriolis	188
4.3 Comparación de características de los medidores de caudal	191

Capítulo 5

Medición de nivel	193
5.1 Medidores de nivel de líquidos	193
5.1.1 Instrumentos de medida directa	194
5.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial	198
5.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento	204
5.1.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido.	206
5.1.5 Medidor de nivel de ultrasonidos	211
5.1.6 Medidor de nivel de radar	213
5.1.7 Medidor de nivel de radiación	216
5.1.8 Medidor de nivel láser	218
5.1.9 Medidor másico de nivel	219
5.2 Medidores de nivel de sólidos	222
5.2.1 Detectores de nivel de punto fijo	222
5.2.2 Detectores de nivel continuos	225

Capítulo 6

Medida de temperaturas	231
6.1 Introducción	231
6.2 Termómetro de vidrio	232
6.3 Termómetro bimetálico	232
6.4 Termómetro de bulbo y capilar	233
6.5 Termómetros de resistencia	235
6.6 Termistores	244
6.7 Termopares	246
6.7.1 Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	246
6.7.2 Circuito galvanométrico	279
6.7.3 Circuito potenciométrico	280
6.7.4 Verificación de un instrumento y de un termopar	282
6.8 Pirómetros de radiación	283
6.8.1 Pirómetros ópticos	286
6.8.2 Pirómetro de infrarrojos	287
6.8.3 Pirómetro fotoeléctrico	288
6.8.4 Pirómetro de dos colores	290
6.8.5 Pirómetros de radiación total	291
6.8.6 Otros fenómenos	295
6.9 Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
6.10 Tabla comparativa de características	300

Capítulo 7

Otras variables	301
7.1 Variables físicas	301
7.1.1 Peso	301
7.1.2 Velocidad	307
7.1.3 Densidad y peso específico	309
7.1.3.1 Introducción	309
7.1.3.2 Areómetros	310
7.1.3.3 Métodos de presión diferencial	311
7.1.3.4 Método de desplazamiento	313
7.1.3.5 Refractómetro	313
7.1.3.6 Método de radiación	315
7.1.3.7 Método de punto de ebullición	316
7.1.3.8 Medidor de ultrasonidos	317
7.1.3.9 Medidores inerciales	317
7.1.3.10 Medidor de Coriolis	319
7.1.3.11 Medidores de balanza	320
7.1.4 Humedad y punto de rocío	322
7.1.4.1 Humedad en aire y gases	323
7.1.4.2 Humedad en sólidos	326
7.1.4.3 Punto de rocío	328
7.1.5 Viscosidad y consistencia	333
7.1.5.1 Introducción	333
7.1.5.2 Viscosímetros	335
7.1.5.3 Medidores de consistencia	337
7.1.6 Llama	338
7.1.6.1 Detector de calor	339
7.1.6.2 Detectores de ionización-rectificación	339
7.1.6.3 Detectores de radiación	340
7.1.6.4 Tabla comparativa de detectores	342
7.1.6.5 Programadores	342
7.1.7 Oxígeno disuelto	345
7.1.8 Turbidez	346
7.1.9 Intensidad de radiación solar	347
7.2 Variables químicas	348
7.2.1 Conductividad	348
7.2.2 pH	350
7.2.3 Redox (potencial de oxidación-reducción)	355
7.2.4 Concentración de gases	356
7.2.4.1 Conductividad térmica	356
7.2.4.2 Paramagnetismo del oxígeno	359
7.2.4.3 Analizador de infrarrojos	359

Capítulo 8

Elementos finales de control	361
8.1 Válvulas de control	361
8.1.1 Generalidades	361
8.1.2 Tipos de válvulas	362
8.1.2.1 Válvulas con obturador de movimiento lineal ..	362
8.1.2.1.1 Válvula de globo	362
8.1.2.1.2 Válvula en ángulo	364
8.1.2.1.3 Válvula de tres vías	364
8.1.2.1.4 Válvula de jaula	364
8.1.2.1.5 Válvula de compuerta	365
8.1.2.1.6 Válvula en Y	365
8.1.2.1.7 Válvula de cuerpo partido	365
8.1.2.1.8 Válvula Saunders	365
8.1.2.1.9 Válvula de compresión	366
8.1.2.2 Válvulas con obturador de movimiento circular	366
8.1.2.2.1 Válvula de movimiento excéntrico rotativo (Camflex) .	366
8.1.2.2.2 Válvula de obturador cilíndrico excéntrico	366
8.1.2.2.3 Válvula de mariposa	366
8.1.2.2.4 Válvula de bola	367
8.1.2.2.5 Válvula de macho	367
8.1.2.2.6 Válvula de orificio ajustable ..	367
8.1.2.2.7 Válvula de flujo axial	367
8.1.3 Cuerpo de la válvula	368
8.1.4 Tapa de la válvula o casquete	372
8.1.5 Partes internas de la válvula. Obturador y asientos	376
8.1.5.1 Generalidades	376
8.1.5.2 Materiales	376
8.1.6 Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales	377
8.1.7 Características de la válvula	383
8.1.7.1 Características de caudal inherente	383
8.1.7.2 Características de caudal efectivas	386
8.1.7.3 Selección de la característica de la válvula	390
8.1.8 Servomotores	396
8.1.8.1 Servomotor neumático	396
8.1.8.2 Servomotor eléctrico	408
8.1.8.3 Servomotor hidráulico	411
8.1.8.4 Servomotor digital	412
8.1.8.5 Tipos de acciones en las válvulas de control ...	413

8.1.9	Accesorios	415
8.1.9.1	Camisa de calefacción	415
8.1.9.2	Volante de accionamiento manual	416
8.1.9.3	Repetidor	416
8.1.9.4	Microrruptores de final de carrera y transmisores de posición	417
8.1.9.5	Válvula de solenoide de tres vías	418
8.1.9.6	Válvula de enclavamiento	419
8.1.9.7	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables	419
8.1.9.8	Manifold	420
8.1.9.9	Posicionador	420
8.1.10	Válvula inteligente	427
8.1.11	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.11.1	Definiciones	428
8.1.11.2	Fórmula general	429
8.1.11.3	Procedimientos de ensayo	431
8.1.11.4	Pérdida de carga	434
8.1.11.5	Caudal máximo	439
8.1.11.6	Densidad	439
8.1.11.7	Tamaño de la válvula	440
8.1.11.8	Líquidos	440
8.1.11.9	Gases	451
8.1.11.10	Vapores	459
8.1.11.11	Régimen bifásico	462
8.1.11.12	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463
8.1.12	Ruido en las válvulas de control	472
8.1.12.1	Generalidades	472
8.1.12.2	Causas del ruido en las válvulas	474
8.1.12.3	Reducción del ruido	477
8.2	Otros elementos finales de control	478
8.2.1	Rectificadores controlados de silicio	480
8.2.2	Bombas dosificadoras	482
8.2.3	Actuadores de velocidad variable	483
8.2.4	Elementos finales varios	484

Capítulo 9

Regulación automática	485
9.1 Introducción	485
9.2 Características del proceso	485
9.3 Tipos de control	490

9.3.1	Control todo-nada	491
9.3.2	Control flotante	492
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable	493
9.3.4	Control proporcional	494
9.3.5	Control proporcional + integral	497
9.3.6	Control proporcional + derivado	499
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	501
9.4	Controladores neumáticos	502
9.5	Controladores electrónicos	503
9.5.1	Controlador todo-nada	503
9.5.2	Control proporcional de tiempo variable	504
9.5.3	Control proporcional	505
9.5.4	Control proporcional + integral	507
9.5.5	Control proporcional + derivado	509
9.5.6	Control proporcional + integral + derivado	510
9.6	Controladores digitales	511
9.6.1	Componentes	511
9.6.2	Algoritmos	513
9.6.3	Controlador digital universal	514
9.7	Selección del sistema de control	516
9.8	Criterios de estabilidad en el control	518
9.9	Métodos de ajuste de controladores	520
9.10	Otros tipos de control	530
9.10.1	Generalidades	530
9.10.2	Control en cascada	531
9.10.3	Programadores	535
9.10.4	Control de relación	536
9.10.5	Control anticipativo	537
9.10.6	Control de gama partida (<i>split-range control</i>)	540
9.10.7	Control selectivo	541
9.10.8	Control de procesos discontinuos	542
9.10.9	Controladores no lineales	543
9.10.10	Instrumentos auxiliares	545
9.11	Seguridad intrínseca y funcional	547
9.11.1	Introducción	547
9.11.2	Nivel de energía de seguridad	548
9.11.3	Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión	548
9.11.4	Clasificaciones de áreas peligrosas	551
9.11.5	Normas	554
9.11.6	Barreras Zener	555
9.11.7	Barreras galvánicas	556
9.11.8	Factores de seguridad	557
9.11.9	Seguridad funcional de los instrumentos	557

9.12	Control por computador	561
9.12.1	Generalidades	561
9.12.2	Control DDC	563
9.12.3	Control supervisor	566
9.12.4	Control distribuido (DCS)	568
9.13	Sistemas de control avanzado	575
9.13.1	Generalidades	575
9.13.2	Correctores	581
9.13.3	Control linealizador global	584
9.13.4	Control estadístico del proceso (SPC)	584
9.13.5	Control multivariable	587
9.13.6	Control óptimo	589
9.13.7	Control adaptativo	591
9.13.8	Control predictivo	594
9.13.9	Sistemas expertos	596
9.13.10	Control por redes neuronales	599
9.13.11	Control por lógica difusa	603
9.14	Control integrado	607
9.14.1	Generalidades	607
9.14.2	Sistema de control básico, control distribuido y control avanzado.	610
9.14.3	Gestión de alarmas	611
9.14.4	Sistema de gestión de laboratorio.	613
9.14.5	Sistema de gestión de la producción	613
9.14.6	Red de comunicaciones	614
9.14.7	Sistema de gestión de seguridad de la planta	616
9.14.8	Sistema de gestión de la calidad (ISO 9000:2000)	617
9.14.9	Estándar OPC de intercambio de datos de proceso	619
9.14.10	Gestión de calibraciones	622

Capítulo 10

Calibración de los instrumentos	627
10.1 Generalidades	627
10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	628
10.3 Calibración de instrumentos de presión, caudal y nivel	632
10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	639
10.5 Calibración de válvulas de control	644
10.6 Calibración de instrumentos digitales	648
10.7 Mantenimiento de instrumentos	648
10.8 Normativa de calidad ISO 9000:2000 aplicada a la instrumentación	651

Capítulo 11

Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control	655
11.1 Generalidades	655
11.2 Calderas de vapor	655
11.2.1 Control de combustión	656
11.2.2 Control de nivel	659
11.2.3 Seguridad de llama	661
11.3 Secaderos y evaporadores	662
11.4 Horno túnel	665
11.5 Columnas de destilación	666
11.6 Intercambiadores de calor	667
11.7 Control del reactor en una central nuclear	671

Apéndice A

Análisis dinámico de los instrumentos	675
A.1 Generalidades	675
A.2 Análisis dinámico de los transmisores	689
A.2.1 Elementos fundamentales	689
A.2.2 Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	689
A.2.2.1 Transmisor electrónico	689
A.2.2.2 Transmisor digital	691
A.3 Análisis dinámico de los controladores	692
A.3.1 Introducción	692
A.3.2 Acción proporcional	692
A.3.2.1 Controlador electrónico	692
A.3.2.2 Control por ordenador	693
A.3.2.3 Diagrama de Bode	697
A.3.3 Acción proporcional + integral	697
A.3.4 Acción proporcional + derivada	699
A.3.5 Acción proporcional + integral + derivada	702
A.3.6 Ensayo de controladores	707
A.4 Iniciación a la optimización de procesos	709
A.4.1 Generalidades	709
A.4.2 Análisis experimental del proceso	710
A.4.3 Estabilidad	712

Apéndice B

Evolución de la instrumentación	731
B.1 Inicios – Instrumentos locales y neumáticos	731
B.2 Instrumentos electrónicos – convencionales y de alta densidad	732

B.3	Computadores	734
B.4	Control distribuido	736
B.5	Control avanzado y transmisores inteligentes	738
B.6	Ergonomía	739
B.7	Comunicaciones	740
B.8	Futuro	740

Apéndice C

Hojas de especificación de instrumentos	745
C.1 Hojas de especificación de instrumentos de presión	745
C.1.1 Manómetros	745
C.1.2 Receptores de presión	747
C.2 Hojas de especificación de instrumentos de caudal	749
C.2.1 Especificación general	749
C.2.2 Medidores magnéticos de caudal	750
C.2.3 Instrumentos de presión diferencial	751
C.3 Hojas de especificación de instrumentos de nivel	753
C.3.1 Transmisión hidrostática	753
C.4 Hojas de especificación de instrumentos de temperatura	754
C.4.1 Sondas de resistencia	754
C.4.2 Termopares	755
C.5 Hojas de especificación de otras variables	755
C.5.1 Densidad	755
C.5.2 Instrumentos de pH	756
C.6 Hojas de especificación de válvulas de control	758
Glosario	761
Referencias	773