

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición	XVII
Capítulo 1 Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (range)	3
1.2.2 alcance (span)	4
1.2.3 error	4
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (accuracy)	7
1.2.7 Zona muerta (dead zone o dead band)	8
1.2.8 Sencibilidad (sensitivity)	8
1.2.9 Repetibilidad (repeatability)	9
1.2.10 Histéresis (hysteresis)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clase de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumento	22
Capítulo 2 Transmisores	51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores reumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformación diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69
Capítulo 3 Medidas de precisión	71
3.1 Unidades y clases de presión	71
3.2 Elementos mecánicos	73
3.3 Elementos neumáticos	75
3.4 Elementos electromecánicos	76
3.4.1 Transmisores eléctricos de equilibrio de fuerzas	76
3.4.2 Transductores resistivos	78
3.4.3 Transductores magnéticos	79
3.4.4 Transductores capacitivos	80
3.4.5 Galgas extensométricas (strain gage)	81
3.4.6 Transductores piezoeléctricos	83
3.5 Elementos electrónicos de vacío	84
3.5.1 Transductores mecánicos de fuelle y de diagrama	84
3.5.2. Medidor McLeod	84

3.5.3 Transductores térmicos	86
3.5.4 Transductores de ionización	87
Capítulo 4 Medidas de Caudal	91
4.1 Medidores volumétricos	92
4.1.1 Instrumento de presión diferencial	92
4.1.1.1 Fórmula general	92
4.1.1.2 Elementos de presión diferencial	105
4.1.1.3 Resumen de las normas ISO 5167 - 1980	107
4.1.1.4 Tubo Pitot	128
4.1.1.5 Tubo Annubar	129
4.1.1.6 Transmisores de fuelle y de diagrama	130
4.1.1.7 Integradores	134
4.1.2 Área variable (rotámetros)	136
4.1.3 Velocidad	146
4.1.3.1 Vertederos y Venturi	146
4.1.3.2 Turbinas	150
4.1.3.3 Transductores ultrasónicos	151
4.1.4 Fuerzas (medidor de placa)	153
4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético)	154
4.1.5.1 Medidor magnético de caudal	154
4.1.6 Desplazamiento positivo	171
4.1.6.1 Medidor de disco oscilante	171
4.1.6.2 Medidor de pistón oscilante	172
4.1.6.3 Medidor de pistón alternativo	173
4.1.6.4 Medidor rotativo	173
4.1.6.5 Medidor rotativo	173
4.1.6.6 Accesorios	176
4.1.7 Torbellino y Vórtex	177
4.1.8 Oscilante	179
4.2 Medidores de caudal masa	179
4.2.1 Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos	180
4.2.2 Medición directa del caudal - masa	185
4.2.2.1 Medidores térmicos de caudal	186
4.2.2.2 medidores de momento angular	187
4.2.2.3 Medidor de Coriolis	189
4.3 Comparación de características de los medidores de caudal	192
Capítulo 5 medición de nivel	193
5.1 Medidores de nivel de líquidos	193
5.1.1 instrumento de medida directa	194
5.1.2 Instrumento basado en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial	197
5.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento	205
5.1.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
5.2 Medidores de nivel de sólidos	213
5.2.1 Detectores de nivel de punto fijo	214
5.2.2 Detectores de nivel continuos	218
Capítulo 6 Medida de temperatura	223
6.1 introducción	223

6.2 Termómetro de vidrio	224
6.3 termómetros biometálico	225
6.4 Termómetro de bulbo y capilar	225
6.5 Termómetro de resistencia	227
6.6 Termisores	236
6.7 Termopares	237
6.7.1 Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
6.7.2 Circuito galvanométrico	268
6.7.3 Circuito potenciométrico	270
6.7.4 Comparación entre circuitos galvanométrico y potenciométrico	276
6.7.5 Verificación de un instrumento y de un termopar	276
6.8 Pirómetros de radiación	277
6.8.1 Pirómetros ópticos	278
6.8.2 Pirómetro fotoeléctricos	281
6.8.3 Pirómetro de radiación total	282
6.9 Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	196
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
7.1.2.1 Tacómetros mecánicos	308
7.1.2.2 Tacómetro eléctrico	308
7.1.3 Densidad y peso específico	310
7.1.3.1 Introducción	310
7.1.3.2 Areómetros	311
7.1.3.3 Métodos de presión diferencial	312
7.1.3.4 Método de desplazamiento	314
7.1.3.5 Refractómetros	315
7.1.3.6 Método de radiación	316
7.1.3.7 Método de punto de ebullición	317
7.1.3.8 Medidor de ultrasonidos	317
7.1.3.9 Medidores inerciales	319
7.1.3.10 Medidor de Coriolis	321
7.1.3.11 Medidores de balanza	322
7.1.4 Humedad y punto de rocío	323
7.1.4.1 Humedad en aire y gases	324
7.1.4.2 Humedad en sólidos	327
7.1.4.3 Punto de rocío	329
7.1.5 Viscosidad y consistencia	334
7.1.5.1 Introducción	334
7.1.5.2 Viscosímetros	336
7.1.5.3 Medidores de consistencia	337
7.15.4 Tabla corporativa	339
7.1.6 Llama	339
7.1.6.1 Detector de calor	340
7.1.6.2 Detectores de ionización – rectificación	340

7.16.3 Detectores de radiación	341
7.16.4 Tabla comparativa de detectores	343
7.16.5 Programadores	343
7.1.6.5 Programadores	343
7.1.7 oxígeno disuelto	346
7.1.8 Turbidez	347
7.1.9 Intensidad de radiación solar	348
7.2 Variables químicas	349
7.2.1 Conductividad	349
7.2.2 pH	353
7.2.3 Redox (potencial de oxidación – reducción)	357
7.2.4 Concentración de gases	358
7.2.4.1 Conductividad térmica	358
7.2.4.2 Paramagnetismo del oxígeno	360
7.2.4.3 analizador de infrarrojos	362
Capítulo 8 Elementos finales de control	365
8.1 Válvulas de control	365
8.1.1 Generalidades	365
8.1.2 Tipos de válvulas	366
8.1.2.1 Válvulas de globo	366
8.1.2.2 Válvula en ángulo	368
8.1.2.3 Válvula de tres vías	368
8.1.2.4 Válvula de jaula	368
8.1.2.5 Válvula de compuerta	368
8.1.2.6 Válvula en Y	368
8.1.2.7 Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8 Válvula Saunders	369
8.1.2.9 Válvula de compresión	369
8.1.2.10 Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11 Válvula de obturador cilíndrico excéntrico	369
8.1.2.12 Válvula de mariposa	369
8.1.2.13 Válvula de bola	370
8.1.2.14 Válvula orificio ajustable	370
8.1.2.15 Válvula de flujo axial	370
8.1.3 Cuerpo de Válvula	371
8.1.4 Tapa de Válvula	374
8.1.5 Partes internas de la válvula. Obturador y asientos	377
8.1.5.1 Generalidades	377
8.1.5.2 Materiales	378
8.1.5.3 Característica de cauda inherente	379
8.1.5.4 Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5 Selección de la características de las válvulas	385
8.1.6 Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales	391
8.1.7 Servomotores	400
8.1.7.1 Servomotor neumático	400
8.1.7.2 Servomotor eléctrico	412
8.1.7.3 Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8 Accesorios	418

8.1.8.1 Camisa de calefacción	418
8.1.8.2 Posicionador	419
8.1.8.3 Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4 Repetidor	424
8.1.8.5 Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera	425
8.1.8.6 Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7 Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8 Válvula de K_v o C_v o carrera ajustable	427
8.1.9 Dimensionamiento de la Válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1 Definiciones	428
8.1.9.2 Fórmulas general	429
8.1.9.3 Líquidos	439
8.1.9.4 Gases	450
8.1.9.5 Vapores	457
8.1.9.6 Régimen bifásico	460
8.1.9.7 Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463
8.1.9.10 Ruido en las válvulas de control	466
8.1.10.1 Generalidades	466
8.1.10.2 Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3 Reducción del ruido	470
8.2 Elementos finales eléctricos	472
8.2.1 Amplificador magnético saturable	472
8.2.2 Rectificadores controlados de silicio	474
8.2.3 Válvulas inteligentes	478
8.3 Otros elementos finales de control	478
Capítulo 9 Regulación automática	481
9.1 Introducción	481
9.2 Características del proceso	481
9.3 sistema de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1 Control todo - nada	487
9.3.2 Control flotante	488
9.3.3 Control proporcional de tiempo variable	489
9.3.4 Control proporcional	490
9.3.5 Control proporcional + integral	494
9.3.6 Control proporcional + derivado	498
9.3.7 Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8 Cambio automático – manual – neumáticos	505
9.3.9 Tendencias en los instrumentos neumáticas	505
9.4 Sistema de control electrónico y digitales	506
9.4.1 Generalidades	506
9.4.2 Control todo – nada	507
9.4.3 Control proporcional tiempo variable	508
9.4.4 Control proporcional	509
9.4.5 Control integra	512
9.4.6 Control derivativo	513
9.4.7 Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8 Control automático – manual - automático	515
9.4.9 Controladores digitales	515

9.5 Selección del sistema de control	521
9.6 Criterios de estabilidad en el control	523
9.7 Métodos de ajuste de controladores	525
9.8 Otros tipos de control	533
9.8.1 Generalidades	533
9.8.2 Control de cascada	534
9.8.3 Programadores	537
9.8.4 Control de relación	541
9.8.5 Control anticipativo	543
9.8.6 Control de gama partida	547
9.8.7 Control selectivo	548
9.8.8 Control de proceso discontinuos	549
9.8.9 Controladores no lineales	551
9.8.10 Instrumentos auxiliares	552
9.9 Seguridad intrínseca	554
9.9.1 Introducción	554
9.9.2 Nivel de energía de seguridad	555
9.9.3 Mecanismo de la ignición en circuitos de baja tensión	556
9.9.4 Clasificación de áreas peligrosas	558
9.9.5 Normas	560
9.9.6 Barreras Zener	560
9.9.7 Barreras galvánicas	562
9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10 Control por computador	563
9.10.1 Generalidades	563
9.10.2 Control DDC	565
9.10.3 Control supervisor	568
9.10.4 Control distribuido	570
9.10.5 Sistemas de control avanzado	574
9.10.6 Sistemas expertos	580
9.10.7 Control por redes neuronales	583
9.10.8 Control por lógica difusa (fuzzy)	585
9.11 Evolución de la instrumentación	587
Capítulo 10 Calibración de los instrumentos	601
10.1 Introducción	601
10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal	610
10.4 Calibración de instrumento de temperatura	614
10.5 Comprobación de válvulas de control	619
10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002	621
Capítulo 11 Aplicaciones en la industria. Esquemas típicas de control	625
11.1 Generalidades	625
11.2 Calderas de vapor	625
11.2.1 Control de combustión	626
11.2.2 Control de nivel	629
11.2.3 Seguridad de llama	632

11.3 Secadores y evaporadores	632
11.4 Horno túnel	635
11.5 Columnas de destilación	637
11.6 Intercambiadores de calor	638
11.7 Control e reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos	645
A. 1 Generalidades	645
A. 2 Análisis dinámico de los transmisores	658
A. 2.1 Elementos fundamentales	658
A. 2.2 Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A. 2.2.1 Transmisor neumático	662
A. 2.2.2 Transmisor electrónico	666
A. 2.2.3 Transmisor digital	667
A. 2.3 Velocidad de repuestas de transmisores	667
A. 2.3.1 Transmisores neumáticos	667
A. 2.3.2 Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3 Análisis dinámico de los controladores	671
A. 3.1 Introducción	671
A. 3.2 Acción proporcional	671
A. 3.3 Acción proporcional + integral	675
A. 3.4 Acción proporcional + derivada	677
A. 3.5 Acción proporcional + integral + derivada	686
A. 3.6 Ensayo de controladores	689
A. 4 Iniciación a la optimización del proceso	693
A. 4.3 Estabilidad	695
A. 5 Control avanzado	715
A. 5. 1Correctores	715
A. 5. 2 Control multivariable	717
A. 5. 3 Control óptimo	718
A. 5. 4 Control adaptativo	720
A. 5. 5 Control predictivo	723
A. 5. 6 Control de redes neuronales	726
A. 5. 7 Control por lógica difusa	727
A. 5. 8 Estructura de control avanzado	730
Referencias	733
Glosario	741