

Contenido

Prefacio

v

1. Sistema neumático y unidades físicas

1

- 1.1 Aplicación de la neumática 1
 - 1.2 Principios físicos 2
 - 1.3 Presión atmosférica 3
 - 1.4 Leyes de los gases 5
 - 1.5 Unidad de presión 7
 - 1.6 Medición del volumen 8
 - 1.7 Unidades SI para los ingenieros especialistas en energía de fluidos 8
 - 1.8 Ventajas del sistema SI 11
- Bibliografía 11*

2. Necesidades básicas para el sistema neumático y disposición de la tubería

12

- 2.1 Sistema básico 12
 - 2.2 Generación del aire comprimido 13
 - 2.3 Selección de la tubería para el sistema neumático 14
 - 2.4 Capacidad nominal de presión para los materiales de tubos 21
 - 2.5 Ajustes de la tubería 22
 - 2.6 Tamaño del tubo 26
 - 2.7 Conectores roscados 26
 - 2.8 Pérdida de presión en la línea neumática 27
 - 2.9 Accesorios para líneas 27
- Bibliografía 32*

3. Compresor de aire

33

- 3.1 Tipos de compresores de aire 33
- 3.2 Clasificación de los compresores 34
- 3.3 Tipos de compresores de aire de desplazamiento positivo 35
- 3.4 Diagrama PV 40
- 3.5 Potencia absorbida en la compresión 41
- 3.6 Otros tipos de compresores 42
- 3.7 Criterios de selección para los compresores 51
- 3.8 Válvulas de compresores en los compresores del tipo reciprocante 54

- 3.9 Tanque de compresión 55
- 3.10 Válvulas de seguridad 56
- 3.11 Control de la capacidad 56
- 3.12 Condensación de agua 59
- 3.13 Cálculo del costo del aire comprimido 61
- Bibliografía* 62

4. Acondicionamiento del aire comprimido

63

- 4.1 Unidad FRL 63
- 4.2 El aire contiene agua 64
- 4.3 Filtro de aire 65
- 4.4 Regulador de presión 68
- 4.5 Lubricador 69
- 4.6 Manómetro 77
- 4.7 Instalación de la unidad FRL 77
- 4.8 Secado del aire comprimido 78
- 4.9 Humedad 78
- 4.10 Secadores refrigerados 82
- 4.11 Secadores químicos 84
- 4.12 Supresión del punto de rocío 85
- 4.13 Secadores de adsorción 86
- 4.14 Métodos de regeneración 86
- 4.15 Regeneración sin calor 86
- 4.16 Precaución importante 87
- 4.17 Selección de los secadores 87
- 4.18 Enfriamiento debido a la expansión del aire 88
- Bibliografía* 88

5. Cilindros y motores neumáticos

89

- 5.1 Tipos de cilindros 89
- 5.2 Cilindro de doble acción 93
- 5.3 Otros cilindros neumáticos 94
- 5.4 Conjunto amortiguador 97
- 5.5 Tipos de montajes 100
- 5.6 Materiales usados para la construcción de cilindros 101
- 5.7 Velocidad del pistón 103
- 5.8 Fuerza del pistón 103
- 5.9 Consumo de aire 104
- 5.10 Tamaño del cilindro 105
- 5.11 Ideas sobre instalación y mantenimiento 105
- 5.12 Lubricación del cilindro 106
- 5.13 Motor neumático 107

- 5.14 Motor neumático y eléctrico: comparación 108
- 5.15 Aplicación de la neumática en las herramientas manuales 111
Bibliografía 117

6. Válvulas neumáticas **118**

- 6.1 Controles neumáticos 118
- 6.2 Válvulas de control de dirección (válvulas C.D.) 119
- 6.3 Construcción básica de las válvulas 122
- 6.4 Control 126
- 6.5 Válvula de impulsos 128
- 6.6 Reguladores de velocidad 131
- 6.7 Válvula de escape rápido 134
- 6.8 Válvula de retraso en el tiempo 134
- 6.9 Funciones lógicas 136
- 6.10 Válvula de lanzadera 136
- 6.11 Válvula gemela de presión 137
- 6.12 Válvula accionada por solenoide 137
Bibliografía 140

7. Circuitos neumáticos básicos **141**

- 7.1 Símbolos 141
- 7.2 Circuito neumático básico 146
- 7.3 Operación por impulsos 147
- 7.4 Control de la velocidad 149
- 7.5 Escalonamiento del movimiento 150
- 7.6 Ejemplo de un diseño de circuito 157
- 7.7 Manejo por vacío 159
- 7.8 Conclusión 161
Bibliografía 161

8. Hidroneumática **162**

- 8.1 Compresibilidad 162
- 8.2 Solución 163
- 8.3 Técnica de conexión 163
- 8.4 Tipos de sistemas hidroneumáticos 163
- 8.5 Unidad hidráulica reguladora 166
- 8.6 Cilindro hidroneumático 167
- 8.7 Unidad reguladora en paralelo 168
- 8.8 Cilindro integral de aire-aceite 168
- 8.9 Tipos de alimentación 169
- 8.10 Intensificador 169

x Contenido

- 8.11 Comparación de los sistemas hidroneumático, hidráulico y neumático 169
Bibliografía 170

9. Flúidica y lógica flúidica 171

- 9.1 Flúidica 171
9.2 Fundamento histórico 173
9.3 ¿Qué lo hace funcionar? 174
9.4 Basculador biestable 175
9.5 Amplificador de turbulencia 177
9.6 Neumática de baja presión 178
9.7 Sensores neumáticos 179
9.8 Aplicación de la flúidica; neumática de baja presión como sensores 180
9.9 Desarrollos futuros 183
9.10 Dispositivo proporcional 185
9.11 Confiabilidad 185
Bibliografía 186

10. Automatización y principio de diseño del circuito neumático 187

- 10.1 Controles neumáticos 187,
10.2 Aplicación en las máquinas-herramientas y otros campos mecánicos 189
10.3 Diagrama funcional en el diseño de un circuito neumático 191
10.4 Diagrama de movimientos 193
10.5 Sistema en cascada del diseño de un circuito neumático 194
10.6 Lógica en el diseño de un circuito neumático 197
10.7 Aritmética binaria 201
10.8 Lógica y álgebra booleana 202
10.9 Teorema de De Morgan de la inversión 203
10.10 Ejemplos de ecuación de control 208
10.11 Uso del mapa de Karnaugh-Veitch para el diseño de un circuito neumático 209
10.12 Diagrama K-V, 213
10.13 Problemas sencillos de control 221
Bibliografía 249

11. Controles eléctricos en los circuitos neumáticos 251

- 11.1 Electroneumática 251
11.2 Electroimanes de accionamiento 252
11.3 Contactores e interruptores 253

11.4	Relevadores	254	
11.5	Interruptor limitador	259	
11.6	Aplicación de las funciones de interrupción; posibilidades	259	
11.7	Circuitos electroneumáticos	261	
	<i>Bibliografía</i>	270	
12.	Mantenimiento del sistema neumático y detección de fallas en el mismo		271
12.1	Necesidad de mantenimiento de los sistemas neumáticos	271	
12.2	Problemas comunes en un sistema neumático	273	
12.3	Programa de mantenimiento de un sistema neumático	277	
12.4	Detección de fallas	280	
12.5	Unas cuantas ideas acerca del mantenimiento	281	
12.6	Resistencia al flujo	282	
12.7	Fallas de los sellos	282	
12.8	Mantenimiento del compresor de aire	284	
12.9	Instrucciones para eliminar los problemas de operación del compresor de aire	286	
	<i>Bibliografía</i>	292	
	Apéndice		293
	Índice		297

Contenido

Prefacio	xi
Reconocimientos	xv
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Por qué se aplican las turbinas de vapor de transmisión mecánica	1
1.2 Panorama general de los fundamentos de las turbinas de vapor	2
1.2.1 Las etapas de las turbinas de vapor pueden variar	5
1.2.2 Diseño moderno de acción	5
1.2.3 Construcción de una sola válvula contra válvulas múltiples	5
1.2.4 Consideraciones sobre el balance de vapor	9
1.3 Panorama general de los tipos de turbinas de vapor y de sus controles	9
1.3.1 Recta sin condensación	14
1.3.2 Sin condensación con extracción automática	15
1.3.3 De condensación con extracción automática	15
1.3.4 Consideraciones básicas sobre el control del vapor	18
1.3.5 Controles para las de condensación con extracción automática	21
1.3.6 De transmisión con engranes y de accionamiento directo	21
1.3.7 Conceptos sobre diseño modular	23
Capítulo 2. Carcasas de las turbinas y componentes estacionarios importantes	29
2.1 Diseño de la carcasa	29
2.2 Secciones de admisión del vapor	33
2.3 Diafragmas y empaquetadura de laberinto de las turbinas de vapor	36
Capítulo 3. Cojinetes para las turbinas de transmisión mecánica	49
3.1 Chumaceras para la turbomaquinaria industrial	49
3.2 Parámetros claves de diseño	55
3.3 Cojinetes de empuje para turbomaquinaria	56
3.4 Cojinetes magnéticos activos	63
Capítulo 4. Rotores para las turbinas de acción	67
4.1 Experiencia de operación de largo plazo	67
4.2 Diámetro de paso y velocidad	68

4.3	Temperatura del vapor	69
4.4	Construcción ensamblada	70
4.5	Construcción maciza	75
4.6	Extremos de las flechas	76
4.7	Métodos de balanceo del rotor de las turbinas	77
4.8	Tolerancia del balanceo	78
Capítulo 5. Rotores para las turbinas de reacción		81
5.1	Rotores macizos	81
5.2	Materiales para los rotores macizos	85
5.3	Diseño de rotor soldado	86
5.4	Materiales para rotores soldados	91
Capítulo 6. Panorama general sobre el diseño de los álabes de las turbinas		95
6.1	Materiales para los álabes	97
6.2	Raíces de sujeción de los álabes	97
6.3	Tipos de superficies aerodinámicas y capacidades de los álabes	99
6.4	Álabes de guía para las turbinas de reacción	100
6.5	Empaquetado de la etapa final de baja presión	106
Capítulo 7. Auxiliares de las turbinas		111
7.1	Sistemas de lubricación	111
7.2	Mecanismos para el arranque o de giro lento	114
7.3	Válvulas de estrangulación y disparo o principales de paro	115
7.4	Dispositivos de disparo por sobrevelocidad	118
7.5	Sistemas de sello de caja estancadora	121
7.6	Purificadores del aceite lubricante	121
Capítulo 8. Reguladores y sistemas de control		123
8.1	Generalidades	123
8.2	Terminología de los sistemas reguladores	126
8.2.1	Regulación de velocidad	126
8.2.2	Variación de velocidad	127
8.2.3	Banda muerta	127
8.2.4	Estabilidad	127
8.2.5	Aumento de velocidad	127
8.3	Clasificaciones de la NEMA	129
8.4	Válvulas	130
8.4.1	Turbinas de una sola válvula	130
8.4.2	Turbinas de válvulas múltiples	131
8.5	Reguladores PG	131
8.6	Reguladores electrónicos	134
8.7	Sistemas reguladores	136
8.7.1	Generalidades	136
8.7.2	Control de la extracción	136

Capítulo 9. Acoplamiento y consideraciones sobre el acoplamiento	143
9.1 Transmisión de potencia	143
9.2 Alineamiento de las flechas	146
9.3 Mantenimiento	148
9.4 Influencia sobre las velocidades críticas	148
9.5 Expansiones diferenciales	148
9.6 Empujes axiales	149
9.7 Límites de aplicación	149
Capítulo 10. Tecnología de la dinámica del rotor	151
10.1 Modelo del rotor	151
10.2 Rigidez dinámica	152
10.3 Efectos del amortiguamiento sobre la predicción de la velocidad crítica	155
10.4 Avances relacionados con los cojinetes	156
10.5 Refinamientos	158
10.6 Consideraciones acerca de los soportes de los cojinetes	159
10.7 Cimentaciones	160
10.8 Impedancia	160
10.9 Fuerzas de arco parcial	164
10.10 Procedimiento de diseño	165
10.11 Respuesta del rotor	166
10.12 Mecanismos de inestabilidad	166
10.13 Vibración subsíncrona	166
10.14 Ejemplos de servicio	168
10.15 Fuerzas de los sellos de laberinto y de la cubierta	171
10.16 Criterios de estabilidad del rotor	173
10.17 Verificación experimental	173
Capítulo 11. Diagramas de Campbell, Goodman y SAFE para los álabes de las turbinas de vapor	175
11.1 Diagrama de Goodman	175
11.2 Diagrama de Goodman-Soderberg	176
11.3 Diagrama de Campbell	177
11.3.1 Frecuencias excitadoras	181
11.4 Diagrama SAFE: herramienta de evaluación del conjunto de disco con álabes en paquete	183
11.4.1 Definición de resonancia	184
11.4.2 Forma del modo	184
11.4.3 Fuerzas fluctuantes	186
11.5 Diagrama SAFE para el conjunto de discos con álabes	189
11.6 Formas de los modos de un disco con álabes en paquete	195
11.7 Diagrama de interferencias más allá del límite $N/2$	197
11.8 Datos explicativos publicados por el uso del diagrama SAFE de Dresser-Rand	200
11.9 Resumen	203

x Contenido

Capítulo 12. Comparación de las turbinas de vapor de reacción contra las de acción	205
12.1 Introducción	205
12.2 Comparación de las turbinas de acción y de reacción	206
12.3 Eficiencia	206
12.4 Diseño	209
12.4.1 Rotor	209
12.4.2 Empaquetado	210
12.5 Erosión	216
12.6 Empuje axial	218
12.7 Mantenimiento	219
12.8 Características de diseño de las turbinas modernas de reacción	219
12.9 Formación de depósitos y lavado de la turbina con agua	221
Capítulo 13. Elementos de transmisión para la turbomaquinaria de alta velocidad	229
13.1 Unidades de engranes rectos	229
13.2 Engranes epicíclicos	231
13.3 Embragues	232
13.4 Transmisiones hidrovíscosas	239
13.5 Convertidores hidrodinámicos y turboacoplamiento con engranes de velocidad variable	243
13.5.1 Función del acoplamiento de etapas múltiples con velocidad variable	247
13.5.2 Detalles de diseño y de operación	247
13.5.3 Circuitos del aceite de trabajo y del aceite de lubricación	250
13.5.4 Sistema de lubricación	250
Capítulo 14. Métodos gráficos abreviados para la selección de turbinas	251
14.1 Instrucciones acerca de la carta de Moillier	251
14.2 Estimación de los gastos de vapor	255
14.3 Información de consulta rápida para estimar los gastos de vapor de las turbinas de vapor de etapas múltiples y de válvulas múltiples	287
Capítulo 15. Método abreviado de selección de Elliott para las turbinas de vapor de etapas múltiples y de válvulas múltiples	293
15.1 Gastos aproximados de vapor	293
15.2 Determinación del rendimiento de las etapas	297
15.3 Rendimiento de la turbina con extracción	304
Apéndice A	313
Bibliografía y lista de colaboradores	333
Índice	341

1.26	Espacio libre del cilindro y eficiencia volumétrica	28
1.27	Espacio libre del cilindro y eficiencia de compresión	31
Capítulo 2. Panorama sobre el diseño de compresores recíprocos de proceso		33
2.1	Diseño del cigüeñal	37
2.2	Cojinetes y sistemas de lubricación	40
2.3	Bielas	43
2.4	Crucetas	43
2.5	Bastidores y cilindros	43
2.6	Suministro de enfriamiento	51
2.7	Pistones	52
2.8	Anillos de pistón y de soporte	52
2.9	Válvulas	53
2.10	Vástagos del pistón	57
2.11	Empaques	60
2.12	Lubricación del cilindro	60
2.13	Espaciadores	65
Capítulo 3. Consideraciones sobre el desempeño de los compresores recíprocos		69
3.1	Importancia del control de la capacidad	69
3.1.1	Reciclar/derivar	70
3.1.2	Estrangulamiento de la succión	71
3.1.3	Descarga de la válvula de succión	71
3.1.4	Cavidades de espacio libre	75
3.2	Más acerca del acomodo de las chaquetas de enfriamiento térmico de los cilindros	78
3.2.1	Métodos de enfriamiento	79
3.3	Comparación de la construcción convencional de un cilindro lubricado versus cilindro no lubricado	82
3.3.1	Diseños de cilindro lubricado	82
3.3.2	Diseño del cilindro no lubricado	85
3.4	La ventilación del compresor y los sistemas de depósito también merecen atención	86
3.5	La instrumentación del compresor siempre es importante	88
3.5.1	Eléctrico versus neumático	94
3.5.2	Puntos de referencia del interruptor	95
3.5.3	Tableros de control	95
3.5.4	Compresores recíprocos con válvulas en el pistón	97
Capítulo 4. Compresores de pistón laberíntico		99
4.1	Principales características de diseño	99
4.2	Consumo de energía	102
4.3	Problemas de sellado	103
Capítulo 5. Hipercompresores		111
5.1	Introducción	111
5.2	Cilindros y sellos del pistón	113
5.3	Cabezas de cilindros y válvulas	119
5.4	Mecanismo impulsor	121
5.5	Varios	124
5.6	Conclusión	125

Capítulo 6. Compresores de diafragma metálico	127
6.1 Introducción	127
6.2 Terminología	127
6.3 Descripción	129
Capítulo 7. Compresores tipo lóbulo y de paleta deslizante	137
7.1 Descripciones	137
Capítulo 8. Compresores de anillo líquido	145
Capítulo 9. Compresores de tornillo rotatorio	151
9.1 Máquinas de tornillos gemelos	151
9.1.1 Fases de trabajo	151
9.1.2 Áreas de aplicación	154
9.1.3 Máquinas secas versus máquinas de inyección de líquido	154
9.1.4 Principios de operación	155
9.1.5 Cálculos de flujo, potencia y temperatura	156
9.1.6 Cálculo de la potencia	158
9.1.7 Aumento de temperatura	159
9.1.8 Control de la capacidad	160
9.1.9 Construcción mecánica	165
9.1.10 Experiencia en la industria	167
9.1.11 Historial de mantenimiento	170
9.1.12 Resumen de desempeño	170
9.2 Compresores de un solo tornillo inundados de aceite	173
Capítulo 10. Fundamentos del rendimiento y dimensionamiento de los compresores recíprocos	179
10.1 Consideraciones sobre capacidad y fugas	180
10.1.1 Capacidad máxima teórica	180
10.2 Pérdidas de capacidad	181
10.3 Precarga de la válvula	182
10.4 Estrangulamiento de los pasajes del gas y de la válvula	182
10.5 Fuga a través del anillo del pistón	184
10.6 Fuga por el empaque	185
10.7 Fuga a través de la válvula de descarga	186
10.8 Fuga por la válvula de succión	187
10.9 Efectos del calentamiento	187
10.10 Efectos de la pulsación	188
10.11 Caballos de potencia	190
10.12 Agregados de potencia	191
10.13 Propiedades del gas	192
10.13.1 Gas ideal	192
10.13.2 Gas real	193
10.14 Ecuaciones de estado alternativas	193
10.15 Condensación	194
10.16 Cargas estructurales	194
10.17 Desplazamiento y espacio libre del compresor	195
10.18 Etapas o escalonamientos	196
10.19 Fundamentos de dimensionamiento	197
10.19.1 Determinación del número de etapas	198

X Contenido

	10.19.2	Determinación aproximada de los caballos de potencia	198
	10.19.3	Determinación de las necesidades de diámetro interior del cilindro	199
	10.19.4	Verificación de la carga estructural	200
	10.19.5	¿Qué sigue?	200
10.20		Ejemplos de dimensionamiento	200
Parte 2. Tecnología del compresor dinámico			209
Capítulo 11. Ecuaciones simplificadas para determinar el rendimiento de los compresores dinámicos			217
	11.1	Características sin sobrecarga de los compresores centrífugos	217
	11.2	Estabilidad	217
	11.3	Cambio de velocidad	219
	11.4	Impulsión del compresor	220
	11.5	Cálculos	221
Capítulo 12. Consideraciones de diseño y técnicas de manufactura			227
	12.1	¿División axial o radial?	227
	12.2	Hermeticidad	227
	12.3	Esfuerzo del material	227
	12.4	Ubicación y mantenimiento de la boquilla	228
	12.5	Revisión del diseño	229
	12.5.1	Carcasas	229
	12.5.2	Trayectoria del flujo	244
	12.5.3	Rotores	247
	12.5.4	Impulsores	250
	12.5.5	Álabes axiales	258
	12.5.6	Sellos	259
	12.6	Configuraciones de cojinetes	268
	12.6.1	Cojinetes radiales	268
	12.6.2	Cojinetes de empuje	270
	12.6.3	Cojinetes de almohadilla inclinada Flexure Pivot™	271
	12.7	Criterios de diseño de la carcasa	276
	12.8	Técnicas de fabricación de las carcasas	285
	12.9	Consideraciones de diseño de la etapa y técnicas de manufactura	296
	12.9.1	Criterios de diseño de la etapa	296
	12.10	Técnicas de fabricación de los impulsores	306
	12.11	Consideraciones dinámicas del rotor	312
	12.12	Consideraciones por acumulación de depósitos y recubrimientos	318
	12.12.1	Polimerización/acumulación de depósitos	319
	12.12.2	Efectos de la acumulación de depósitos sobre la operación del compresor	320
	12.12.3	Estudio de un caso de recubrimiento	321
	12.12.4	Recubrimiento SermaLon	322
	12.12.5	Resultados	324
Capítulo 13. Sello de gas seco y sistemas de cojinete magnético			325
	13.1	Antecedentes	325
	13.2	Sellos secos	326
	13.2.1	Principios de operación	326
	13.2.2	Experiencia de operación	330

	13.2.3 Problemas y soluciones	330
	13.2.4 Diseños mejorados del sello seco	331
13.3	Cojinetes magnéticos	332
	13.3.1 Principios de operación	332
	13.3.2 Experiencia de operación y beneficios	335
	13.3.3 Problemas y soluciones	336
13.4	Esfuerzos de perfeccionamiento	337
	13.4.1 Sellos de reducción de empuje	338
13.5	Diseños integrados disponibles	341
Capítulo 14. Acoplamientos, transmisión de par de torsión y sensores		347
14.1	Panorama general de los acoplamientos	347
	14.1.1 Bajo momento flexor	350
	14.1.2 Bajo desbalanceo residual deseado	351
	14.1.3 Larga vida y facilidad de mantenimiento	353
	14.1.4 La lubricación continua no es un remedio para todo	354
	14.1.5 Panorama general del acoplamiento de diafragma de contorno	355
14.2	Optimización del rendimiento por medio del monitoreo del par de torsión	357
Capítulo 15. Sistemas de aceite de lubricación, sello y control para turbomaquinaria		367
15.1	Consideraciones comunes a todos los sistemas	367
15.2	Consideraciones sobre el aceite de sello	370
Capítulo 16. Control del compresor		373
16.1	Introducción	373
16.2	Objetivos del sistema de control	373
16.3	Mapas del compresor	374
	16.3.1 Coordenadas invariantes	377
16.4	Control del rendimiento	380
	16.4.1 Algoritmos de control PI y PID	382
	16.4.2 Consideraciones de estabilidad	384
	16.4.3 Limitante integral o de restablecimiento	385
16.5	Limitaciones al rendimiento	386
	16.5.1 Límite de oscilación	386
	16.5.2 Efecto de barrera	389
16.6	Prevención de la oscilación	389
	16.6.1 Variables de control antioscilación	390
	16.6.2 Algoritmos de control antioscilación	391
	16.6.3 Control de las variables limitantes	392
16.7	Desacoplamiento del ciclo	393
16.8	Conclusión	394
Capítulo 17. Forma de la curva de carga y flujo de los compresores centrífugos		395
17.1	La etapa del compresor	395
17.2	Elementos de la forma característica	396
	17.2.1 Pendiente básica	397
	17.2.2 El ángulo del álabe es un término medio	398

x Contenido

10.19.2	Determinación aproximada de los caballos de potencia	198
10.19.3	Determinación de las necesidades de diámetro interior del cilindro	199
10.19.4	Verificación de la carga estructural	200
10.19.5	¿Qué sigue?	200
10.20	Ejemplos de dimensionamiento	200

Parte 2. Tecnología del compresor dinámico 209**Capítulo 11. Ecuaciones simplificadas para determinar el rendimiento de los compresores dinámicos 217**

11.1	Características sin sobrecarga de los compresores centrífugos	217
11.2	Estabilidad	217
11.3	Cambio de velocidad	219
11.4	Impulsión del compresor	220
11.5	Cálculos	221

Capítulo 12. Consideraciones de diseño y técnicas de manufactura 227

12.1	¿División axial o radial?	227
12.2	Hermeticidad	227
12.3	Esfuerzo del material	227
12.4	Ubicación y mantenimiento de la boquilla	228
12.5	Revisión del diseño	229
12.5.1	Carcasas	229
12.5.2	Trayectoria del flujo	244
12.5.3	Rotores	247
12.5.4	Impulsores	250
12.5.5	Álabes axiales	258
12.5.6	Sellos	259
12.6	Configuraciones de cojinetes	268
12.6.1	Cojinetes radiales	268
12.6.2	Cojinetes de empuje	270
12.6.3	Cojinetes de almohadilla inclinada. Flexure Pivot™	271
12.7	Criterios de diseño de la carcasa	276
12.8	Técnicas de fabricación de las carcasas	285
12.9	Consideraciones de diseño de la etapa y técnicas de manufactura	296
12.9.1	Criterios de diseño de la etapa	296
12.10	Técnicas de fabricación de los impulsores	306
12.11	Consideraciones dinámicas del rotor	312
12.12	Consideraciones por acumulación de depósitos y recubrimientos	318
12.12.1	Polimerización/acumulación de depósitos	319
12.12.2	Efectos de la acumulación de depósitos sobre la operación del compresor	320
12.12.3	Estudio de un caso de recubrimiento	321
12.12.4	Recubrimiento SermaLon	322
12.12.5	Resultados	324

Capítulo 13. Sello de gas seco y sistemas de cojinete magnético 325

13.1	Antecedentes	325
13.2	Sellos secos	326
13.2.1	Principios de operación	326
13.2.2	Experiencia de operación	330

13.2.3	Problemas y soluciones	330
13.2.4	Diseños mejorados del sello seco	331
13.3	Cojinetes magnéticos	332
13.3.1	Principios de operación	332
13.3.2	Experiencia de operación y beneficios	335
13.3.3	Problemas y soluciones	336
13.4	Esfuerzos de perfeccionamiento	337
13.4.1	Sellos de reducción de empuje	338
13.5	Diseños integrados disponibles	341
Capítulo 14. Acoplamientos, transmisión de par de torsión y sensores		347
14.1	Panorama general de los acoplamientos	347
14.1.1	Bajo momento flexor	350
14.1.2	Bajo desbalanceo residual deseado	351
14.1.3	Larga vida y facilidad de mantenimiento	353
14.1.4	La lubricación continua no es un remedio para todo	354
14.1.5	Panorama general del acoplamiento de diafragma de contorno	355
14.2	Optimización del rendimiento por medio del monitoreo del par de torsión	357
Capítulo 15. Sistemas de aceite de lubricación, sello y control para turbomaquinaria		367
15.1	Consideraciones comunes a todos los sistemas	367
15.2	Consideraciones sobre el aceite de sello	370
Capítulo 16. Control del compresor		373
16.1	Introducción	373
16.2	Objetivos del sistema de control	373
16.3	Mapas del compresor	374
16.3.1	Coordenadas invariantes	377
16.4	Control del rendimiento	380
16.4.1	Algoritmos de control PI y PID	382
16.4.2	Consideraciones de estabilidad	384
16.4.3	Limitante integral o de restablecimiento	385
16.5	Limitaciones al rendimiento	386
16.5.1	Límite de oscilación	386
16.5.2	Efecto de barrera	389
16.6	Prevención de la oscilación	389
16.6.1	Variables de control antioscilación	390
16.6.2	Algoritmos de control antioscilación	391
16.6.3	Control de las variables limitantes	392
16.7	Desacoplamiento del ciclo	393
16.8	Conclusión	394
Capítulo 17. Forma de la curva de carga y flujo de los compresores centrífugos		395
17.1	La etapa del compresor	395
17.2	Elementos de la forma característica	396
17.2.1	Pendiente básica	397
17.2.2	El ángulo del álabe es un término medio	398

17.2.3	El efecto de la ley del ventilador	400
17.2.4	El efecto de ahogamiento	401
17.2.5	Consideraciones sobre el número de Mach	402
17.2.6	Importancia del peso del gas	403
17.2.7	El impulsor inductor aumenta la producción de carga	403
17.2.8	Oscilación	404
17.2.9	Difusores con álabes	406
17.2.10	Difusores sin álabes	406
17.2.11	Velocidades equivalentes de la punta	407
17.3	Conclusiones	409
Capítulo 18. Aplicación de los compresores de admisión múltiple		411
18.1	Criterios críticos de selección	411
18.1.1	Aumento de carga a oscilación, margen de oscilación, margen de sobrecarga	412
18.1.2	Carga por sección	413
18.1.3	Flujos parásitos del compresor	414
18.1.4	Márgenes excesivos en otros equipos de proceso	415
18.1.5	Representación del rendimiento del compresor	416
18.1.6	Niveles prácticos de los parámetros críticos de operación	417
18.2	Diseño del compresor de carga lateral	419
18.2.1	Área de mezclado	419
18.2.2	Aerodinámica	420
18.2.3	Estratificación de la temperatura	424
18.3	Pruebas	424
18.3.1	Preparación de la prueba	424
18.3.2	Instrumentación	425
18.3.3	Procedimiento de prueba	425
18.3.4	Exactitud de los resultados de prueba	426
18.3.5	Evaluación de los resultados	426
Capítulo 19. Predicción del rendimiento del compresor en condiciones nuevas		427
19.1	Documentación de las pruebas de rendimiento	427
19.2	Parámetros de diseño: ¿Qué afecta al rendimiento?	428
19.2.1	Termodinámica	428
19.2.2	Mecánica	429
19.3	Qué buscar en los documentos de los proveedores	430
19.3.1	Datos de la prueba de rendimiento	430
19.4	Ilustraciones y ejemplo	431
Apéndice A	Propiedades de los gases comunes	437
Apéndice B	Cálculos rápidos y procedimientos gráficos para seleccionar compresores	445
Índice		501