

# Contenido

|   |          |
|---|----------|
| Prefacio  | xiii     |
| <b>Parte 1 Tecnología de compresores de desplazamiento positivo</b> | <b>1</b> |
| <b>Capítulo 1. Teoría</b>   | <b>3</b> |
| 1.1 Símbolos  | 3        |
| 1.2 Cómo trabaja un compresor                                       | 5        |
| 1.3 La primera ley de la termodinámica                              | 9        |
| 1.4 La segunda ley de la termodinámica                              | 9        |
| 1.5 Ley de los gases ideales o perfectos                            | 10       |
| 1.5.1 Ley de Boyle  | 10       |
| 1.5.2 Ley de Charles  | 10       |
| 1.5.3 Ley de Amonton  | 10       |
| 1.5.4 Ley de Dalton   | 11       |
| 1.5.5 Ley de Amagat   | 11       |
| 1.5.6 Ley de Avogadro   | 11       |
| 1.5.7 La fórmula del gas perfecto                                   | 11       |
| 1.6 Presión de vapor  | 12       |
| 1.7 Gas y vapor   | 12       |
| 1.8 Presiones parciales   | 13       |
| 1.9 Condiciones críticas  | 15       |
| 1.10 Compresibilidad  | 15       |
| 1.11 Gráficas generalizadas de compresibilidad                      | 16       |
| 1.12 Mezclas de gases   | 17       |
| 1.13 La mol   | 17       |
| 1.14 Volumen específico y densidad                                  | 18       |
| 1.15 Porcentaje de volumen de los componentes                       | 18       |
| 1.16 Peso molecular de la mezcla                                    | 19       |
| 1.17 Peso específico y presión parcial                              | 19       |
| 1.18 Relación de calores específicos                                | 20       |
| 1.19 Condiciones pseudocríticas y compresibilidad                   | 21       |
| 1.20 Propiedades base-peso  | 21       |
| 1.21 Ciclos de compresión   | 21       |
| 1.22 Requisito de potencia  | 23       |
| 1.23 Corrección de compresibilidad                                  | 24       |
| 1.24 Etapas múltiples   | 25       |
| 1.25 Referencias de volumen   | 27       |

**viii    Contenido**

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 1.26  | Espacio libre del cilindro y eficiencia volumétrica   | 28         |
| 1.27  | Espacio libre del cilindro y eficiencia de compresión   | 31         |
| <b>Capítulo 2. Panorama sobre el diseño de compresores recíprocos de proceso</b>    |   | <b>33</b>  |
| 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         |
| <b>Capítulo 3. Consideraciones sobre el desempeño de los compresores recíprocos</b> |   | <b>69</b>  |
| 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         |
| <b>Capítulo 4. Compresores de pistón laberíntico</b>                                |   | <b>99</b>  |
| 4.1   | Principales características de diseño   | 99         |
| 4.2   | Consumo de energía  | 102        |
| 4.3   | Problemas de sellado  | 103        |
| <b>Capítulo 5. Hipercompresores</b>   |   | <b>111</b> |
| 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        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Capítulo 6. Compresores de diafragma metálico</b>   | <b>127</b> |
| 6.1 Introducción   | 127        |
| 6.2 Terminología   | 127        |
| 6.3 Descripción  | 129        |
| <b>Capítulo 7. Compresores tipo lóbulo y de paleta deslizante</b>                                | <b>137</b> |
| 7.1 Descripciones  | 137        |
| <b>Capítulo 8. Compresores de anillo líquido</b>   | <b>145</b> |
| <b>Capítulo 9. Compresores de tornillo rotatorio</b>   | <b>151</b> |
| 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        |
| <b>Capítulo 10. Fundamentos del rendimiento y dimensionamiento de los compresores recíprocos</b> | <b>179</b> |
| 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 <i>SermaLon</i>   | 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        |
| <b>Capítulo 14. Acoplamientos, transmisión de par de torsión y sensores</b>                 |   | <b>347</b> |
| 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        |
| <b>Capítulo 15. Sistemas de aceite de lubricación, sello y control para turbomaquinaria</b> |   | <b>367</b> |
| 15.1  | Consideraciones comunes a todos los sistemas                            | 367        |
| 15.2  | Consideraciones sobre el aceite de sello                                | 370        |
| <b>Capítulo 16. Control del compresor</b>   |   | <b>373</b> |
| 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        |
| <b>Capítulo 17. Forma de la curva de carga y flujode los compresores centrífugos</b>        |   | <b>395</b> |
| 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        |

**xii    Contenido**

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 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        |
| <b>Capítulo 18. Aplicación de los compresores de admisión múltiple</b>             |  | <b>411</b> |
| 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        |
| <b>Capítulo 19. Predicción del rendimiento del compresor en condiciones nuevas</b> |  | <b>427</b> |
| 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        |
| <b>Apéndice A</b>  | <b>Propiedades de los gases comunes</b>  | <b>437</b> |
| <b>Apéndice B</b>  | <b>Cálculos rápidos y procedimientos gráficos para seleccionar compresores</b> | <b>445</b> |
| Índice   |  | 501        |