



FUNDAMENTOS DE REFRIGERACIÓN



 **Atecyr**

Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración

COORDINADOR:

D. José Fernández Seara

REVISOR:

D. José Manuel Pinazo Ojer

AUTORES:

- D. Alberto Albert Soto, Ingeniero Industrial. Director Técnico de Pecomark.
- D. David Astrain Ulibarrena, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular del Área de Máquinas y Motores Térmicos en la Universidad Pública de Navarra.
- D. Ángel Barragán Cervera, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Ramón Cabello López, Doctor Ingeniero Industrial. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Pedro Coya Alonso, Master en Ingeniería Industrial. Director IngeDetail.
- D. Rubén Diz Montero, Ingeniero Industrial. Profesor del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Vigo.
- D. José Antonio Fernández Benítez, Profesor Titular del Área de Máquinas Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- D. José Fernández Seara, Doctor Ingeniero Industrial. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Vigo.
- D. Julio Ferradal Mora, Ingeniero Agrónomo. Director de la oficina de ventas de Emerson Climate Technologies.
- D. Rodrigo Llopis Doménech, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Jorge Lorenzo Vázquez, Ingeniero industrial.
- D. Pedro Juan Martínez Beltrán, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Miguel Hernández de Elche.
- D. Álvaro Martínez Echeverri, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor del Área de Máquinas y Motores Térmicos en la Universidad Pública de Navarra.
- D. Francisco Moles, Ingeniero Industrial. Investigador grupo ISTENER de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Adrián Mota Babiloni, Ingeniero Industrial. Investigador grupo ISTENER de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Manuel Muñoz Alonso, Químico Industrial. Ingeniero Senior en aplicaciones en Shrieve Products International Ltd., sede en UK.
- D. Joaquín Navarro Esbrí, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Carles Oliet Casasayas, Doctor Ingeniero Industrial. Investigador de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica de Terrassa de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- D. Bernardo Peris, Ingeniero Industrial. Investigador grupo ISTENER de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Francisco Javier Rey Martínez, Doctor en Ciencias Físicas. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Valladolid.
- D. Joaquim Rigola Serrano, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular de Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica de Terrassa de la Universidad Politécnica de Cataluña.

- D. Julio Francisco San José Alonso, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Valladolid.
- D. Daniel Sánchez García-Vacas, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Jaume I de Castellón.
- D. Félix Sanz del Castillo, Experto en control de refrigeración de la empresa Danfoss S.A.
- D. Carlos Sanz-Kock, Doctor Ingeniero Industrial.
- D. Enrique Torrella Alcaraz, Doctor Ingeniero Industrial. Catedrático del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia.
- D. Alberto Vales Alonso, Ingeniero Industrial. Managing Director de GEA Refrigeration Ibérica, S.A.
- D. Eloy Velasco Gómez, Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Valladolid.
- D^a. Paloma Vírveda Chamorro, Doctora en Ingeniería Agroalimentaria. Catedrática de Tecnología de Alimentos en la Universidad Pública de Navarra.

RELACIÓN DE MIEMBROS DEL COMITÉ TÉCNICO DE ATECYR

Presidente: D. José Manuel Pinazo Ojer

Vicepresidente: D. Ricardo García San José

Vocales:

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| D. Alberto Viti | D. José Manuel Cejudo López |
| D. Alejandro Cabetas Hernández | D. José Fernández Seara |
| D. José María Cano Marcos | D. Juan Travesí Cabetas |
| D. José Antonio Rodríguez Tarodo | D. Pedro Torrero Gras |
| D. Rafael Úrculo Aramburu | D. José Luis Barrientos Moreno |
| D. Antonio Vegas Casado | D. Miguel Ángel Navas Martín |
| D. Ramón Velázquez Vila | D. Manuel Sánchez Marín Flores |
| D. José Luis Esteban Saiz | D. Justo García Sanz-Calcedo |
| D. Pedro G. Vicente Quiles | D. Ignacio Leiva Pozo |
| D. Agustín Maíllo Pérez | D. Gorka Goiri Celaya |
| D. Víctor Manuel Soto Francés | D. Nicolás Bermejo Presa |
| D. Iñaki Morcillo Irastorza | D. Miguel Zamora García |
| D. Antonio Paniego Gómez | D. Manuel Acosta Malia |
| D. Francisco Javier Rey Martínez | D. Vidal Díaz Martínez |
| D. Adrián Gomila Vinent | D. Miguel Angel Llopis |
| D. Paulino Pastor Pérez | D. Arcadio García Lastra |

©ATECYR

Edita: ATECYR
Agastia 112 A
28043 Madrid

Producción y Realización:
ATECYR

ISBN: 987-84-95010-54-4
Dep. Legal: M-14166-2015

***Queda prohibida la total o parcial reproducción del contenido de este documento salvo expresa autorización de Atecyr.**

CURSOS PROPIOS DE ATECYR

Un proyecto: Nuestro compromiso en la formación

ATECYR cumple al pie de la letra con su carácter asociativo y transforma, fielmente, los fines que figuran en sus estatutos en objetivos a cumplir y en forma de trabajar.

Los Estatutos que rigen nuestra Asociación definen como fines de ATECYR:

- El estudio, en todas sus vertientes y manifestaciones, de la problemática, la ordenación, la reglamentación, y la protección y desarrollo de las técnicas de climatización, en su más amplio sentido, comprendiendo en tales, y sin carácter limitativo, la calefacción refrigeración, ventilación y acondicionamiento de aire en cualquiera de sus manifestaciones técnicas, así como en todo lo relacionado con el frío industrial, fontanería, uso racional de la energía, gestión de la energía, eficiencia energética, energías renovables, y, en particular la energía solar, térmica, eólica y biomasa, cogeneración, ingeniería del medio ambiente, y de cualesquiera otras actividades directa o indirectamente relacionadas con las mismas.
- La creación, recopilación y divulgación de información científica relacionada con estas tecnologías en España respecto a estas técnicas, cuyo objeto es el entorno ambiental del hombre, la sostenibilidad y el desarrollo de la misma, así como el fomento y desarrollo del interés por el diseño y equipamiento de este entorno, a fin de mejor cumplir su función social.
- La investigación, realización de estudios y análisis relativos a esta temática, así como la recomendación de planes de actuación y Transferencia de Tecnología.
- La organización de Cursos, Seminarios, Simposios, Conferencias y, en general, de cuantas actividades vayan encaminadas a la formación y divulgación, en su más amplio sentido, en el ámbito material en el que la Asociación desarrolla su actividad, desde la propia Asociación o en colaboración con Entidades u Organismos públicos o privados nacionales o extranjeros de similares o complementarios campos de actuación.
- La certificación y acreditación de la capacitación de profesionales y de personal, en el ámbito de actuación material en el que la Asociación desarrolla su actividad.
- Potenciar la colaboración y realizar acuerdos con cualesquiera otras entidades de cualquier naturaleza, públicas o privadas, nacionales o extranjeras, en el desarrollo del ámbito material en el que la Asociación desarrolla su actividad.
- Colaborar con las Administraciones Central, Autonómicas o Locales así como con cualquier otro organismo o entidad pública o privada, asesorándolas o prestándolas la asistencia necesaria para la confección, desarrollo y/o interpretación de la normativa y reglamentación relativa al ámbito material en el que la Asociación desarrolla su actividad.

Pensamos que nuestra aportación principal a la ingeniería y a la sociedad en general es ofrecer valiosas herramientas para la formación y el reciclaje.

La actividad de la asociación descansa en dos pilares fundamentales: Las Agrupaciones como grandes generadoras de nuestra actividad y como instrumentos que nos permitan la cercanía y el servicio al socio, y el Comité Técnico, compuesto por un grupo de expertos muy respetados en nuestro sector, que, de alguna manera, han marcado las tendencias y la forma de hacer las cosas en los últimos años y que se constituye como el gran dinamizador de toda nuestra actividad.

Para la consecución de sus fines, ATECYR lleva a cabo una intensa actividad de colaboración con entes públicos y privados, mediante la participación en grupos de trabajo para la elaboración de distintas normas con el Ministerio de Fomento. Con el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, como miembro de pleno derecho en la Comisión Asesora de Certificación Energética y del RITE, así como asesor técnico en casos de tanta relevancia como la contabilización de consumos o las Auditorías Energéticas. Colaboramos con un gran

número de Comunidades Autónomas y Ayuntamientos, gracias a la incansable actividad de las Agrupaciones Provinciales con que contamos llevan a cabo.

En el campo normativo es digno de resaltar la adjudicación del concurso restringido convocado por el IDAE para la revisión del Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE), en diciembre de 2003 y que se aprobó y publicó el 20 de julio de 2007, Real Decreto 1027/2007 y la secretaría y coordinación de las 26 asociaciones representativas del sector, para proponer al ministerio la modificación de este reglamento que se ha publicado en el año 2013, RD 238/2013.

En este ámbito, lo más destacado, en los últimos tiempos, es el desarrollo de 2 nuevos cursos propios desarrollados por el Comité Técnico de Atecyr y que cuentan con los más prestigiosos profesores del sector que son:

- El Curso de Experto en Climatización de 300 horas.
- El Curso de Auditor y Gestor Energético en la Edificación y la Industria de 264 horas.

ATECYR es autor junto al IVE de CERMA que ya es Documento Reconocido para la certificación de eficiencia energética, según lo dispuesto en el artículo 3 del Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción según registro CCE-DR-OOS11.

La colección de Documentos Técnicos de Instalaciones en la Edificación (DTIE) nace como una respuesta a la necesidad detectada de agrupar y ordenar la información técnica sobre una serie de temas específicos mediante la elaboración de unas guías donde se reúna toda la información que el técnico precisa sobre el tema en cuestión para desarrollar su labor.

El Comité Técnico de ATECYR viene trabajando desde hace años, en la elaboración de una ingente documentación de divulgación científico-técnica sobre temas relacionados con el sector de climatización y refrigeración. Entre esta documentación, se encuentran traducciones de libros y artículos considerados de interés y bibliografía propia.

Se trata de ofrecer al técnico una herramienta útil para la realización de su trabajo, sin tratar de condicionar su creatividad, incluyendo la última tecnología y tendencias, dejando a su interpretación las cuestiones normativas.

Este manual nace con el propósito de asentar los conocimientos básicos en Refrigeración que un recién titulado debe de tener antes de enfrentarse a un proyecto de Refrigeración y poder dar una herramienta de diseño a los técnicos ya formados, que según marcan las actuales Directivas de gases fluorados, tendrán que conocer y diseñar equipos frigoríficos que trabajen con refrigerantes con bajo potencial de calentamiento global.

En sus veinte capítulos recoge un amplio número de temas, desde las propiedades los refrigerantes, calculo de cargas térmicas de refrigeración, sistemas y tecnologías de equipos de refrigeración, modo de selección de los diferentes componentes del ciclo de refrigeración, sin olvidarse claro está, de la normativa y legislación aplicable a este sector. El libro está acompañado de un curso de Experto en Refrigeración de 170 horas de tal manera que, el tándem curso más libro es una herramienta fundamental que ayudará al técnico en su futura actividad profesional en el sector de la Refrigeración.

Sólo queda agradecer su aportación a los patrocinadores de los capítulos de este Manual de Fundamentos de Refrigeración sin cuya ayuda sería imposible completar este interesante proyecto y presentarle este nuevo libro.

Juan José Quixano Burgos
Presidente de ATECYR

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| PRÓLOGO | 17 |
| 1 CONCEPTOS BÁSICOS Y SISTEMAS DE COMPRESIÓN SIMPLE | 19 |
| 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS | 19 |
| 1.1.1 TEMPERATURA, PRESIÓN, CALOR Y CAMBIOS DE ESTADO, TRABAJO | 20 |
| 1.1.2 DIAGRAMA P-H | 21 |
| 1.1.3 MEZCLAS BINARIAS | 24 |
| 1.1.4 P-H DE UNA MEZCLA BINARIA ZEOTRÓPICA..... | 25 |
| 1.2 PRINCIPIOS DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN SIMPLE | 25 |
| 1.2.1 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL CICLO INVERTIDO DE CARNOT [5]..... | 26 |
| 1.2.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL CICLO IDEAL SECO O CICLO ESTÁNDAR | 27 |
| 1.2.3 FACTORES QUE ALTERAN EL CICLO IDEAL. ANÁLISIS DEL CICLO REAL [6]..... | 29 |
| 1.2.4 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO REAL DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SIMPLE. .. | 30 |
| 1.3 CICLOS MEJORADOS SOBRE EL SISTEMA DE COMPRESIÓN SIMPLE | 31 |
| 1.3.1 SISTEMA CON ACUMULADOR DE ALTA PRESIÓN (AAP)..... | 31 |
| 1.3.2 SISTEMA CON EYECTOR COMO ELEMENTO DE EXPANSIÓN (EEX) | 32 |
| 1.3.3 SISTEMA CON INTERCAMBIADOR DE CALOR INTERMEDIO (ICI)..... | 32 |
| 1.3.4 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SOBREALIMENTADO (SA)..... | 33 |
| 1.4 VARIANTES SOBRE EL SISTEMA DE COMPRESIÓN SIMPLE | 34 |
| 1.4.1 SISTEMA DE COMPRESIÓN SIMPLE DE PROPÓSITO MÚLTIPLE | 34 |
| 1.4.2 LICUEFACCIÓN DE GASES | 34 |
| 1.4.3 SISTEMA DE COMPRESIÓN SIMPLE CON ACUMULADOR INTERMEDIO / INTERCAMBIADOR | 35 |
| 1.4.4 SISTEMA DE COMPRESIÓN SIMPLE TRANSCRÍTICO | 36 |
| 2 SISTEMAS DE COMPRESIÓN MÚLTIPLE | 39 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 39 |
| 2.2 CAMPO DE UTILIZACIÓN | 39 |
| 2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMPRESIÓN MÚLTIPLE DIRECTA | 45 |
| 2.4 SISTEMAS DE COMPRESIÓN MÚLTIPLE DIRECTA | 46 |
| 2.4.1 SISTEMAS CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO MEDIANTE UN AGENTE EXTERNO | 46 |
| 2.4.2 SISTEMAS CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO MEDIANTE EXPANSIÓN PARCIAL CON INYECCIÓN DIRECTA..... | 48 |
| 2.4.3 SISTEMAS CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO MEDIANTE EXPANSIÓN PARCIAL CON SUBENFRIAMIENTO EN UN INTERCAMBIADOR | 50 |
| 2.4.4 SISTEMAS CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO MEDIANTE EXPANSIÓN PARCIAL A UN DEPÓSITO ENFRIADOR-SEPARADOR-CERRADO. | 52 |
| 2.4.5 SISTEMA CON ENFRIAMIENTO INTERMEDIO MEDIANTE EXPANSIÓN TOTAL EN UN DEPÓSITO ENFRIADOR-SEPARADOR-ABIERTO | 55 |
| 2.4.6 SISTEMAS CON ECONOMIZADOR..... | 57 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 2.5 | CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA PRESIÓN INTERMEDIA..... | 62 |
| 2.5.1 | IGUALES RELACIONES DE COMPRESIÓN EN AMBAS ETAPAS..... | 63 |
| 2.5.2 | IGUAL TEMPERATURA DE DESCARGA EN AMBAS ETAPAS..... | 64 |
| 2.5.3 | MÍNIMO TRABAJO DE COMPRESIÓN..... | 66 |
| 2.6 | SISTEMAS DE COMPRESIÓN MÚLTIPLE INDIRECTA O SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN EN CASCADA..... | 67 |
| 2.6.1 | CAMPO DE UTILIZACIÓN..... | 67 |
| 2.6.2 | SISTEMAS DE COMPRESIÓN MÚLTIPLE INDIRECTA..... | 67 |
| 2.6.3 | PARTICULARIDADES A TENER EN CUENTA EN LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN EN CASCADA..... | 70 |
| 2.7 | SISTEMAS DE EXPANSIÓN MÚLTIPLE PARA LA PRODUCCIÓN DE FRÍO A DISTINTAS TEMPERATURAS..... | 71 |
| 2.7.1 | SISTEMAS DE EXPANSIÓN MÚLTIPLE..... | 71 |
| 2.7.2 | VÁLVULAS REGULADORAS DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN..... | 73 |
| 3 | COMPRESORES FRIGORÍFICOS..... | 77 |
| 3.1 | EVOLUCIÓN HISTÓRICA..... | 77 |
| 3.2 | TIPOS DE COMPRESORES..... | 79 |
| 3.3 | LOS COMPRESORES ALTERNATIVOS..... | 81 |
| 3.3.1 | CLASIFICACIÓN..... | 81 |
| 3.3.2 | FUNCIONES DEL COMPRESOR..... | 81 |
| 3.3.3 | ELEMENTOS AUXILIARES DE UN COMPRESOR ALTERNATIVO..... | 92 |
| 3.3.4 | REGULACIÓN DE POTENCIA EN COMPRESORES ALTERNATIVOS. ESTRATEGIAS EN CARGA PARCIAL..... | 93 |
| 3.4 | LOS COMPRESORES ROTATIVOS DE PALETAS..... | 106 |
| 3.4.1 | COMPRESORES DE PALETA ESTACIONARIA (FIGURA 3.45)..... | 107 |
| 3.4.2 | COMPRESOR MULTIPALETA..... | 109 |
| 3.4.3 | COMPRESORES DE PALETAS. COMENTARIOS..... | 111 |
| 3.5 | COMPRESORES DE TORNILLO..... | 112 |
| 3.5.1 | COMPRESORES DE DOBLE TORNILLO..... | 113 |
| 3.5.2 | COMPRESORES MONOTORNILLO..... | 120 |
| 3.5.3 | COMPARACIÓN DE LOS COMPRESORES DE TORNILLO CON LOS ALTERNATIVOS..... | 122 |
| 3.6 | COMPRESORES SCROLL..... | 123 |
| 3.6.1 | BASES GENERALES DEL DISEÑO DE UN COMPRESOR SCROLL..... | 123 |
| 3.6.2 | CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL COMPRESOR SCROLL..... | 128 |
| 3.6.3 | PARTICULARIDADES DE LOS COMPRESORES SCROLL DE REFRIGERACIÓN..... | 129 |
| 3.6.4 | MODULACIÓN DE CAPACIDAD FRIGORÍFICA..... | 133 |
| 4 | CONDENSADORES Y TORRES DE REFRIGERACIÓN..... | 139 |
| 4.1 | INTRODUCCIÓN CONDENSADORES..... | 139 |
| 4.2 | TRANSMISIÓN DE CALOR EN EL CONDENSADOR..... | 139 |
| 4.2.1 | COEFICIENTE DE PELÍCULA DE CONDENSACIÓN..... | 141 |
| 4.2.2 | FACTOR DE INCRUSTACIONES..... | 141 |
| 4.2.3 | COEFICIENTE DE PELÍCULA DEL FLUIDO DE DISIPACIÓN..... | 142 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.2.4 | DIFERENCIA DE TEMPERATURA PARA EL CÁLCULO..... | 142 |
| 4.3 | CLASIFICACIÓN DE LOS CONDENSADORES | 143 |
| 4.3.1 | CONDENSADORES POR AIRE | 144 |
| 4.3.2 | CONDENSADORES POR AGUA..... | 145 |
| 4.3.3 | CONDENSADOR EVAPORATIVO | 147 |
| 4.4 | SELECCIÓN DE UN CONDENSADOR..... | 148 |
| 4.4.1 | TEMPERATURAS DE CONDENSACIÓN | 148 |
| 4.4.2 | POTENCIA DEL CONDENSADOR | 149 |
| 4.4.3 | DATOS PARA LA SELECCIÓN DE UN CONDENSADOR | 149 |
| 4.5 | FUNDAMENTO TEÓRICO TORRES DE REFRIGERACIÓN. | 151 |
| 4.6 | TIPOS DE TORRES DE REFRIGERACIÓN. | 155 |
| 4.7 | CONDICIONES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO..... | 157 |
| 4.7.1 | SELECCIÓN Y DIMENSIONADO | 157 |
| 4.7.2 | OPERACIÓN..... | 158 |
| 4.7.3 | MANTENIMIENTO..... | 159 |
| 5 | EVAPORADORES Y SISTEMAS DE DESESCARCHE | 163 |
| 5.1 | INTRODUCCIÓN. TIPOS DE EVAPORADORES..... | 163 |
| 5.1.1 | CLASIFICACIÓN DE LOS EVAPORADORES..... | 163 |
| 5.2 | PROCESO DE SELECCIÓN DE UN EVAPORADOR DE TUBOS-ALETAS..... | 171 |
| 5.2.1 | EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN..... | 172 |
| 5.2.2 | EFFECTO DEL REFRIGERANTE | 173 |
| 5.2.3 | EFFECTO DEL NIVEL SONORO | 174 |
| 5.2.4 | PROYECCIÓN DEL AIRE. SELECCIÓN DE LA POSICIÓN DEL EVAPORADOR. SELECCIÓN DE MÚLTIPLES EVAPORADORES | 174 |
| 5.2.5 | CONSUMO DE LOS VENTILADORES..... | 175 |
| 5.3 | PROCESO DE SELECCIÓN PARA UN EVAPORADOR TUBOS-ALETAS. | 175 |
| 5.4 | SISTEMAS DE DESESCARCHE. | 175 |
| 5.5 | CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESESCARCHE | 179 |
| 5.5.1 | DESESCARCHE POR AIRE..... | 180 |
| 5.5.2 | DESESCARCHE POR AGUA. | 181 |
| 5.5.3 | DESESCARCHE POR RESISTENCIAS..... | 181 |
| 5.5.4 | DESESCARCHE POR GAS CALIENTE | 182 |
| 6 | CONTROL EN SISTEMAS DE EXPANSIÓN..... | 193 |
| 6.1 | CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE EXPANSIÓN SECA | 193 |
| 6.2 | EVAPORACIÓN Y CURVA MSS. SUBENFRIAMIENTO Y TÍTULO..... | 193 |
| 6.3 | CAPILARES | 196 |
| 6.4 | VÁLVULAS PRESOSTÁTICAS | 197 |
| 6.5 | VÁLVULAS TERMOSTÁTICAS. EQUILIBRIO DE FUERZAS. BULBOS..... | 198 |
| 6.6 | FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE EXPANSIÓN TERMOSTÁTICA | 200 |
| 6.7 | VÁLVULAS DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICAS | 202 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 6.8 | ACOPLAMIENTO DE VÁLVULAS A LA CURVA MSS DEL EVAPORADOR | 203 |
| 6.9 | SELECCIÓN DE VÁLVULAS DE EXPANSIÓN..... | 204 |
| 6.10 | CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO | 205 |
| 7 | FLUIDOS REFRIGERANTES, ACEITES Y FLUIDOS SECUNDARIOS..... | 211 |
| 7.1 | FLUIDOS REFRIGERANTES | 211 |
| 7.1.1 | INTRODUCCIÓN | 211 |
| 7.1.2 | DESIGNACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES | 213 |
| 7.1.3 | PROPIEDADES DE LOS REFRIGERANTES..... | 216 |
| 7.1.4 | REFRIGERANTES PUROS Y MEZCLAS | 220 |
| 7.1.5 | SELECCIÓN Y APLICACIONES DE LOS REFRIGERANTES..... | 221 |
| 7.2 | LUBRICANTES EN SISTEMAS FRIGORÍFICOS..... | 223 |
| 7.2.1 | INTRODUCCIÓN. FUNCIÓN DEL LUBRICANTE | 223 |
| 7.2.2 | TIPOS DE LUBRICANTES..... | 224 |
| 7.2.3 | PROPIEDADES DESEABLES EN LOS LUBRICANTES PARA INSTALACIONES FRIGORÍFICAS..... | 226 |
| 7.2.4 | COMPATIBILIDAD LUBRICANTE / REFRIGERANTE. | 230 |
| 7.3 | FLUIDOS SECUNDARIOS..... | 233 |
| 7.3.1 | INTRODUCCIÓN | 233 |
| 7.3.2 | LÍQUIDOS UTILIZADOS COMO FLUIDOS SECUNDARIOS | 235 |
| 7.3.3 | PROPIEDADES TERMO-FÍSICAS DE FLUIDOS SECUNDARIOS | 237 |
| 8 | LÍNEAS DE REFRIGERANTE Y ACCESORIOS | 243 |
| 8.1 | CONTROLES UBICADOS EN LAS TUBERÍAS DE CIRCUITOS FRIGORÍFICOS..... | 243 |
| 8.2 | VÁLVULAS DE SOLENOIDE. NORMALMENTE ABIERTAS Y CERRADAS..... | 243 |
| 8.3 | VÁLVULA INVERSORA DE 4 VÍAS..... | 244 |
| 8.4 | VÁLVULAS REGULACIÓN DE PRESIÓN Y TEMPERATURA..... | 245 |
| 8.4.1 | REGULACIÓN DE LA PRESIÓN DEL EVAPORADOR | 246 |
| 8.4.2 | REGULACIÓN DE LA PRESIÓN DE ASPIRACIÓN..... | 246 |
| 8.4.3 | REGULACIÓN DE CAPACIDAD..... | 247 |
| 8.4.4 | REGULACIÓN DE LA PRESIÓN DE CONDENSACIÓN..... | 248 |
| 8.4.5 | VÁLVULAS MULTIFUNCIONALES | 249 |
| 8.5 | TERMOSTATOS Y PRESOSTATOS | 251 |
| 8.5.1 | TERMOSTATOS | 252 |
| 8.5.2 | PRESOSTATOS..... | 253 |
| 8.6 | VÁLVULAS MANUALES Y DE RETENCIÓN..... | 254 |
| 8.7 | VÁLVULAS DE SEGURIDAD | 256 |
| 8.8 | SELECCIÓN Y CÁLCULO DE VÁLVULAS | 257 |
| 8.9 | CONTAMINANTES INTERNOS. VISORES Y FILTROS..... | 258 |
| 8.10 | TUBERÍAS EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN | 261 |
| 8.10.1 | HERRAMIENTAS DE CÁLCULO Y SELECCIÓN | 261 |
| 8.10.2 | CÁLCULO Y DISEÑO DE LÍNEAS DE REFRIGERANTE | 262 |
| 8.10.3 | RECOMENDACIONES PRÁCTICAS..... | 266 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 9 | SISTEMAS DE CONTROL, SEGURIDAD Y TELEGESTIÓN DE INSTALACIONES | 269 |
| 9.1 | INTRODUCCIÓN | 269 |
| 9.2 | DIFERENCIA ENTRE CONTROL Y SEGURIDAD. | 270 |
| 9.3 | AUTOMATIZACIÓN DE INSTALACIONES FRIGORÍFICAS. | 270 |
| 9.4 | DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA. | 271 |
| 9.5 | PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONTROL. TIPOS DE CONTROL Y CONTROLADORES. | 273 |
| 9.5.1 | PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONTROL. | 273 |
| 9.5.2 | CLASIFICACIÓN DE LOS REGULADORES. | 274 |
| 9.6 | DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE ELEMENTOS DE CONTROL USUALES EN UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA. | 281 |
| 9.6.1 | ELEMENTOS DE CONTROL ELECTRÓNICO. | 281 |
| 9.7 | EJEMPLO DEL CONTROL Y SEGURIDAD DE UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA BÁSICA. | 283 |
| 9.7.1 | EJEMPLO DE CONTROL DE LA INSTALACIÓN. | 284 |
| 9.7.2 | EJEMPLO DE SEGURIDAD DE LA INSTALACIÓN. | 286 |
| 9.8 | OBTENCIÓN DE AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE EL CONTROL. | 290 |
| 9.8.1 | CONDENSACIÓN FLOTANTE. | 290 |
| 9.8.2 | APLICACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA (INVERTERS). | 291 |
| 9.8.3 | CONTROL DE LA INYECCIÓN DE LÍQUIDO MEDIANTE VÁLVULAS DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICAS (V.E.E.). | 293 |
| 9.8.4 | EVAPORACIÓN FLOTANTE. | 294 |
| 9.8.5 | DESESCARCHE INTELIGENTE. | 294 |
| 9.9 | TELEGESTIÓN DE INSTALACIONES FRIGORÍFICAS. | 295 |
| 9.9.1 | COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELEGESTIÓN: | 295 |
| 9.9.2 | FUNCIONES DE UN SOFTWARE DE TELEGESTIÓN: | 296 |
| 10 | CONSERVACIÓN Y CONGELACIÓN DE ALIMENTOS | 299 |
| 10.1 | INTRODUCCIÓN | 299 |
| 10.2 | PROCESO DE CONGELACIÓN DE ALIMENTOS | 299 |
| 10.3 | TRANSFORMACIONES FÍSICAS EN LA CONGELACIÓN | 301 |
| 10.3.1 | TERMODINÁMICA DE LA TRANSFORMACIÓN DEL AGUA EN HIELO. | 302 |
| 10.3.2 | PROPIEDADES TÉRMICAS. | 302 |
| 10.4 | CÁLCULOS DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN. | 302 |
| 10.5 | FUNDAMENTOS DE LA CRISTALIZACIÓN | 306 |
| 10.6 | DAÑOS POR CONGELACIÓN EN LOS ALIMENTOS | 308 |
| 10.7 | ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE ALIMENTOS CONGELADOS. | 309 |
| 10.7.1 | CAMBIOS DURANTE EL ALMACENAMIENTO. | 309 |
| 10.7.2 | LA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS CONGELADOS. | 309 |
| 10.7.3 | LA DESCONGELACIÓN. | 310 |
| 11 | CÁMARAS Y TÚNELES DE CONGELACIÓN | 313 |
| 11.1 | CÁMARAS FRIGORÍFICAS | 313 |
| 11.1.1 | INTRODUCCIÓN | 313 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 11.1.2 | TIPOS DE CÁMARAS | 313 |
| 11.1.3 | CONSTRUCCIÓN DE CÁMARAS FRIGORÍFICAS | 314 |
| 11.1.4 | OPERACIÓN DE LAS CÁMARAS | 327 |
| 11.2 | TÚNELES DE CONGELACIÓN | 328 |
| 11.3 | OTROS RECINTOS..... | 330 |
| 12 | ESTIMACIÓN DE LA CARGA EN UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA..... | 333 |
| 12.1 | INTRODUCCIÓN..... | 333 |
| 12.2 | DATOS DE PARTIDA..... | 333 |
| 12.3 | ENFRIAMIENTO DEL PRODUCTO DE ENTRADA | 335 |
| 12.3.1 | TEMPERATURAS. EL PROCESO DE PRE-ENFRIAMIENTO. | 336 |
| 12.3.2 | PROPIEDADES FÍSICAS DEL PRODUCTO | 337 |
| 12.3.3 | TONELAJE DE ENTRADA. "M _D " [TM/DÍA]..... | 337 |
| 12.4 | TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE CERRAMIENTOS | 340 |
| 12.5 | CALOR DESPRENDIDO POR EL PRODUCTO..... | 354 |
| 12.6 | RENOVACIÓN DE AIRE | 355 |
| 12.6.1 | ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO | 360 |
| 12.6.2 | MEDICIÓN EXPERIMENTAL. NÚMERO DE RENOVACIONES | 365 |
| 12.6.3 | OTRAS CONSIDERACIONES. CONDENSACIÓN (CONGELACIÓN) DEL VAPOR DE AGUA PRESENTE EN EL AIRE DE INFILTRACIÓN | 368 |
| 12.7 | CARGA DEBIDA A LA PRESENCIA DE VENTILADORES Y BOMBAS..... | 371 |
| 12.8 | ILUMINACIÓN..... | 374 |
| 12.9 | PERSONAS..... | 374 |
| 12.10 | MOTORES INTERNOS..... | 375 |
| 12.11 | EFECTO DE LA HUMEDAD (MERMAS DE MASA)..... | 377 |
| 12.12 | OTRAS PÉRDIDAS. COEFICIENTE DE SEGURIDAD | 378 |
| 12.13 | POTENCIA FRIGORÍFICA NECESARIA..... | 379 |
| 12.14 | OTRAS INSTALACIONES..... | 380 |
| 13 | INSTALACIONES CON REFRIGERANTES HALOGENADOS | 401 |
| 13.1 | EL USO DE REFRIGERANTES HALOGENADOS EN INSTALACIONES FRIGORÍFICAS..... | 401 |
| 13.2 | EL REGLAMENTO DE SEGURIDAD PARA INSTALACIONES FRIGORÍFICAS (RSIF) QUE EMPLEAN REFRIGERANTES HALOGENADOS | 401 |
| 13.3 | APLICACIONES DE LOS REFRIGERANTES HALOGENADOS EN LAS INSTALACIONES FRIGORÍFICAS | 405 |
| 13.3.1 | REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA..... | 405 |
| 13.3.2 | REFRIGERACIÓN COMERCIAL/INDUSTRIAL..... | 411 |
| 13.3.3 | REFRIGERACIÓN APLICADA A LA CLIMATIZACIÓN EN AUTOMOCIÓN | 422 |
| 14 | INSTALACIONES CON AMONÍACO | 427 |
| 14.1 | CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL AMONÍACO | 427 |
| 14.1.1 | EVOLUCIÓN DEL AMONÍACO EN LA INDUSTRIA FRIGORÍFICA | 427 |
| 14.1.2 | IMPLICACIONES DEL USO DE AMONÍACO EN UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA | 427 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 14.2 | INSTALACIONES DE AMONÍACO. SU DISEÑO | 429 |
| 14.2.1 | CONFIGURACIÓN GENERAL | 429 |
| 14.2.2 | DISPOSITIVOS DE LA INSTALACIÓN | 431 |
| 14.3 | CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD A TENER EN CUENTA EN INSTALACIONES DE AMONÍACO..... | 445 |
| 14.4 | EL FUTURO DE LAS INSTALACIONES DE AMONÍACO | 445 |
| 15 | INSTALACIONES QUE UTILIZAN CO₂ COMO REFRIGERANTE | 449 |
| 15.1 | INTRODUCCIÓN..... | 449 |
| 15.2 | APLICACIONES..... | 454 |
| 15.3 | PROPIEDADES DEL CO₂ COMO REFRIGERANTE..... | 456 |
| 15.4 | COMPATIBILIDADES [15.11] | 465 |
| 15.5 | INSTALACIONES DE CO₂ OPERANDO EN RÉGIMEN TRANSCRÍTICO..... | 467 |
| 15.6 | INSTALACIONES DE CO₂ OPERANDO EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO | 478 |
| 16 | REGLAMENTACIÓN | 487 |
| 16.1 | INTRODUCCIÓN..... | 487 |
| 16.2 | PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE EL REGLAMENTO DEL VIGENTE Y EL ANTERIOR..... | 489 |
| 16.3 | RESUMEN DE LOS ARTÍCULOS DEL RD 138/2011 [16.1]..... | 490 |
| 16.4 | INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS(IF-XX) | 493 |
| 16.4.1 | CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES (IF-02) | 494 |
| 16.4.2 | CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN (IF-03) | 494 |
| 16.4.3 | UTILIZACIÓN DE LOS REFRIGERANTES (IF-04)..... | 494 |
| 16.4.4 | DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, MATERIALES Y AISLAMIENTO (IF-05)..... | 494 |
| 16.4.5 | COMPONENTES DE LAS INSTALACIONES (IF-06)..... | 495 |
| 16.4.6 | SALA DE MÁQUINAS (IF-07) | 495 |
| 16.4.7 | PROTECCIÓN CONTRA SOBREPRESIONES (IF-08) | 496 |
| 16.4.8 | ENSAYOS Y PRUEBAS (IF-09)..... | 497 |
| 16.4.9 | MARCADO Y DOCUMENTACIÓN (IF-10)..... | 498 |
| 16.4.10 | CÁMARAS Y SALAS DE PROCESO (IF-11)..... | 499 |
| 16.4.11 | INSTALACIONES ELÉCTRICAS (IF-12) | 499 |
| 16.4.12 | MEDIOS TÉCNICOS MÍNIMOS REQUERIDOS PARA EMPRESAS FRIGORISTAS (IF-13) | 500 |
| 16.4.13 | MANTENIMIENTO, REVISIONES E INSPECCIONES DE LAS INSTALACIONES (IF-14)..... | 500 |
| 16.4.14 | PUESTA EN SERVICIO Y REQUISITOS DEL PROYECTO (IF-15)..... | 501 |
| 16.4.15 | PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN (IF-16)..... | 501 |
| 16.4.16 | MANIPULACIÓN DE REFRIGERANTE Y REDUCCIÓN DE FUGAS (IF-17)..... | 502 |
| 16.4.17 | IDENTIFICACIÓN DE TUBERÍAS (IF-18)..... | 502 |
| 17 | OTROS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE FRÍO..... | 505 |
| 17.1 | SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN | 505 |
| 17.1.1 | INTRODUCCIÓN..... | 505 |
| 17.1.2 | CICLOS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN | 506 |
| 17.1.3 | EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN..... | 514 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 17.1.4 | APLICACIONES DE LA REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN | 518 |
| 17.2 | PRODUCCIÓN DE FRÍO MEDIANTE SISTEMAS ELÉCTRICOS: REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA Y MAGNÉTICA | 527 |
| 17.2.1 | INTRODUCCIÓN..... | 527 |
| 17.2.2 | REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA..... | 527 |
| 17.2.3 | EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LA TERMOELECTRICIDAD..... | 529 |
| 17.2.4 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN REFRIGERADOR TERMOELÉCTRICO | 530 |
| 17.2.5 | FENÓMENOS FÍSICOS Y SU RESOLUCIÓN EN LA TERMOELECTRICIDAD..... | 532 |
| 17.2.6 | EJEMPLOS DE APLICACIÓN Y EQUIPOS..... | 536 |
| 17.2.7 | FUTURO DE LA TERMOELECTRICIDAD. | 538 |
| 18 | EFICIENCIA ENERGÉTICA | 541 |
| 18.1 | INTRODUCCIÓN..... | 541 |
| 18.1.1 | INCREMENTO DEL COSTE ENERGÉTICO..... | 541 |
| 18.1.2 | INCREMENTO DE LA PREOCUPACIÓN MEDIOAMBIENTAL..... | 542 |
| 18.2 | IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL..... | 542 |
| 18.3 | LA JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA..... | 544 |
| 18.3.1 | EL AHORRO ENERGÉTICO | 544 |
| 18.3.2 | LOS COSTES DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA..... | 545 |
| 18.4 | ACTUACIONES | 545 |
| 18.5 | LÍNEAS DE ACCIÓN..... | 546 |
| 18.6 | FUNDAMENTOS..... | 546 |
| 18.7 | DISEÑO DE LA INSTALACIÓN | 547 |
| 18.7.1 | ELECCIÓN DEL REFRIGERANTE | 547 |
| 18.7.2 | LA CONFIGURACIÓN DEL CICLO | 549 |
| 18.7.3 | TIPO DE COMPRESOR..... | 550 |
| 18.7.4 | EFICIENCIA DEL COMPRESOR DE TORNILLO A CARGA PARCIAL | 551 |
| 18.7.5 | USO DEL VARIADOR DE VELOCIDAD PARA LA REGULACIÓN DE CAPACIDAD DE UN COMPRESOR DE TORNILLO | 553 |
| 18.7.6 | FINALMENTE.... ¿ALTERNATIVO O TORNILLO? | 554 |
| 18.7.7 | LAS CONEXIONES DEL COMPRESOR | 555 |
| 18.7.8 | LA REGULACIÓN DE V_i EN LOS COMPRESORES DE TORNILLO..... | 556 |
| 18.7.9 | LA CONDENSACIÓN FLOTANTE | 558 |
| 18.7.10 | LOS MOTORES ELÉCTRICOS | 560 |
| 18.7.11 | RACIONALIZACIÓN DE LA DEMANDA FRIGORÍFICA | 562 |
| 18.7.12 | APROVECHAMIENTO DEL CALOR RESIDUAL..... | 562 |
| 18.7.13 | LA UTILIZACIÓN DE BOMBAS DE CALOR..... | 563 |
| 19 | DISEÑO, CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES EN UNA INSTALACIÓN TIPO .. | 569 |
| 19.1 | VISIÓN GLOBAL DEL PROCESO DE DISEÑO..... | 569 |
| 19.2 | DEFINICIÓN DE LAS BASES Y CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA..... | 570 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 19.2.1 | UBICACIÓN DE LA INSTALACIÓN..... | 570 |
| 19.2.2 | USO DE LA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA..... | 572 |
| 19.2.3 | BALANCE DE CARGAS FRIGORÍFICAS..... | 573 |
| 19.3 | DIMENSIONADO Y SELECCIÓN TÉCNICA DE COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA..... | 576 |
| 19.3.1 | SELECCIÓN SISTEMA DE COMPRESIÓN..... | 576 |
| 19.3.2 | SELECCIÓN DEL EVAPORADOR Y SISTEMA DE DESESCARCHE..... | 581 |
| 19.3.3 | SELECCIÓN DEL CONDENSADOR..... | 584 |
| 19.3.4 | SELECCIÓN DEL RECIPIENTE DE LÍQUIDO..... | 592 |
| 19.3.5 | SELECCIÓN DE LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN..... | 593 |
| 19.3.6 | CÁLCULO DE TUBERÍAS..... | 596 |
| 19.3.7 | CUADRO ELÉCTRICO. SISTEMA DE CONTROL..... | 601 |
| 19.3.8 | EQUIPOS AUXILIARES..... | 601 |
| 19.4 | PROCESO DE LEGALIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA..... | 602 |
| 19.4.1 | PROCEDIMIENTO EN INSTALACIONES NIVEL 1:..... | 603 |
| 19.4.2 | PROCEDIMIENTO EN INSTALACIONES NIVEL 2:..... | 605 |
| 19.4.3 | PROCEDIMIENTO TRAMITACIÓN..... | 606 |
| 20 | DIAGRAMAS DE PROPIEDADES DE REFRIGERANTES..... | 609 |
| | PRESIONES Y TEMPERATURAS DE SATURACIÓN DE LOS REFRIGERANTES..... | 610 |
| | R744 – CO₂..... | 611 |
| | R717 – NH₃..... | 612 |
| | R600A – ISOBUTANO..... | 613 |
| | R290 – PROPANO..... | 614 |
| | R134A..... | 615 |
| | R507A..... | 616 |
| | R404A..... | 617 |
| | R407C..... | 618 |
| | R410A..... | 619 |
| | - BIBLIOGRAFIA..... | 623 |

PRÓLOGO

La refrigeración se ha convertido en uno de los pilares fundamentales de nuestra sociedad. La producción de frío hace posible el transporte y la conservación de productos perecederos, constituye la base de los sistemas de climatización, resulta imprescindible en gran cantidad de procesos industriales y abre nuevas posibilidades en el mundo de la investigación y del desarrollo de nuevas tecnologías.

El presente texto pretende cubrir una carencia existente actualmente en cuanto a libros de fundamentos con contenidos actualizados sobre los sistemas y aplicaciones de la refrigeración. El libro se ha elaborado con el objetivo de servir de texto básico para los alumnos en las asignaturas de Grado y Postgrado en los que se imparten materias relacionadas con la refrigeración, así como para los ingenieros, instaladores y otros profesionales que deseen complementar y actualizar su formación teórica.

El libro se centra en los sistemas de refrigeración por compresión y en sus aplicaciones para la producción de frío en cámaras y túneles de congelación, si bien también se incluyen capítulos específicos sobre los sistemas de absorción y los sistemas de refrigeración termoeléctrica y magnética.

El texto se inicia con el estudio de los conceptos básicos y de los ciclos utilizados en los sistemas de refrigeración por compresión. A continuación se exponen, en capítulos independientes, los principios de funcionamiento, tipos y características de los componentes fundamentales de estos sistemas, las propiedades y la situación actual de los refrigerantes y otros fluidos de trabajo, así como de los diversos componentes adicionales y de los sistemas de seguridad y control utilizados en las instalaciones.

Posteriormente se abordan los procesos de enfriamiento y congelación de productos perecederos, los métodos de la estimación de las cargas en cámaras y túneles de congelación y sus características constructivas, y se consideran, en capítulos específicos, las particularidades del diseño y utilización de las instalaciones en las que se utilizan refrigerantes halogenados, amoníaco o CO₂. Se incluyen también capítulos específicos de análisis de la normativa aplicable a este tipo de instalaciones y de las posibilidades de mejora en su eficiencia energética, así como un caso práctico en el que se detalla el cálculo y dimensionamiento de una instalación tipo.

El texto consta de un total de 20 capítulos en cuya elaboración han participado 29 autores. Todos los autores son expertos con dilatada experiencia y reconocido prestigio en el mundo de la refrigeración y procedentes de diversos ámbitos, así, entre ellos se encuentran profesionales que ejercen su actividad en destacadas empresas dedicadas a la ingeniería e instalación de sistemas de refrigeración, en empresas fabricantes de diversos tipos de componentes utilizados en las instalaciones, así como profesores de Universidad con experiencia en la docencia e investigación dentro de los diversos campos de la refrigeración.

El hecho de elaborar un texto con un gran número de autores procedentes de ámbitos distintos ha requerido de un considerable esfuerzo de coordinación y revisión, para tratar de evitar repeticiones y uniformizar los contenidos de los diversos capítulos. Sin embargo, por otro lado, la participación de autores provenientes de ámbitos distintos aporta riqueza a los contenidos y permite conocer las diversas visiones de los profesionales que ejercen su actividad dentro del campo de la refrigeración.

Por último, quiero manifestar mi agradecimiento a ATECYR, por hacer posible la puesta en marcha de esta iniciativa y convertirla en realidad, a José Manuel Pinazo por confiarme su coordinación y por su revisión del texto, a Rubén Diz por su colaboración en las labores de coordinación y, muy especialmente, quiero mostrar mi agradecimiento a todos los autores que han participado en la elaboración de los diversos capítulos, sin cuya dedicación y esfuerzo no hubiera sido posible.

Vigo, 15 de diciembre de 2015.

José Fernández Seara

1 CONCEPTOS BÁSICOS Y SISTEMAS DE COMPRESIÓN SIMPLE

Autores: Joaquim Rigola y Carles Oliet

Desde la prehistoria se conoce que el agua almacenada en un recipiente poroso se vuelve más fría que el ambiente. Aún sin conocer las razones físicas, las civilizaciones que habitan regiones cálidas y secas han utilizado estos sistemas para enfriar agua. Este proceso de refrigeración por evaporación es muy simple, y está basado principalmente en el hecho de que el agua cuando se evapora necesita energía para pasar de un estado líquido a un estado gas. Esta energía la puede tomar del ambiente, pero también la puede tomar de sí misma. Así cuando se evapora una parte de agua, extrae energía del resto y hace que el agua remanente disminuya su temperatura. El hecho de utilizar un medio poroso, como la arcilla en los botijos por ejemplo, hace que parte del agua se filtre a través de sus paredes y en contacto con el ambiente se evapore, produciendo el enfriamiento del agua que queda dentro.

Para poder entender que está sucediendo, cuando y como estos procesos se llevan a cabo y poder explicar porque conseguimos procesos de enfriamiento o refrigeración necesitamos introducir una serie de conceptos o principios. En este sentido, la Termodinámica es la ciencia que estudia la energía (capacidad de producir cambios), sus transformaciones (trabajo o potencia y calor) y su relación con los estados de la materia (gas, líquido, etc.). El presente capítulo pretende analizar la aplicación de la Termodinámica y sus conceptos básicos a los ciclos de refrigeración en general y a los sistemas de compresión simple en particular.

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Por un lado, la temperatura y la presión son propiedades termodinámicas de las sustancias, que en equilibrio termodinámico sirven como variables independientes para cuantificar el resto de variables termodinámicas que definen el comportamiento de una sustancia como la densidad, la energía interna, la entalpía, la entropía, etc. Por otro lado, entendemos el trabajo (potencia o consumo) y el calor (producción frigorífica) como formas de transmisión de energía, mientras que la energía interna es la acumulación de esa energía en la materia causada por el movimiento de sus moléculas y/o por las fuerzas intermoleculares. Finalmente nos queda definir la entalpía como otra propiedad termodinámica de la materia que es la suma de la energía interna antes citada, más el trabajo de flujo asociado a esa masa (que es la energía necesaria para que el fluido pueda circular a través del sistema).

La experiencia enseña que existen relaciones entre estas propiedades y que no todas ellas actúan independientemente las unas de las otras. No es necesario pues medir todas y cada una de las propiedades para tener caracterizado un sistema. Así a modo general, una sustancia pura que está en una sola fase solo necesita conocer el valor de dos variables independientes (propiedades termodinámicas que denominaremos variables de estado) para definir el sistema (generalmente la temperatura y la presión son las más adecuadas). El resto de propiedades como la densidad, la energía interna, la entalpía, etc. se calculan a partir de estas primeras. La materia existe en 3 estados físicos: fase sólida, fase líquida y fase gas. En el caso de una sustancia pura en dos fases en equilibrio es necesario definir una tercera variable, pues ya veremos que dada la presión la temperatura queda fijada y viceversa.

Así, en cualquier análisis termodinámico de un ciclo de refrigeración o de un sistema de compresión, la temperatura y la presión en los puntos del sistema nos permitirán conocer las propiedades termodinámicas del fluido refrigerante en dichos puntos, tales como la densidad

para el análisis de cargas o la entalpía, y sus variaciones para determinar los flujos de intercambio calor absorbidos o cedidos, así como el trabajo o la potencia transferida [1].

1.1.1 Temperatura, presión, calor y cambios de estado, trabajo

La temperatura es una propiedad termodinámica cuya magnitud física es la misma entre dos sustancias si estas están en equilibrio térmico. Esto es, si dos sustancias en contacto no intercambian calor es que están a la misma temperatura. Así las escalas de temperatura nos indicarán las variaciones entre distintos puntos a partir de unos valores de referencia. De esta manera, la escala centígrada o Celsius por ejemplo, establece el 0 °C en el punto de fusión del hielo y el 100 °C (99.97 °C) en el punto de ebullición del agua (ambos a 1 atm).

La presión es el resultado de la aplicación de una fuerza sobre una superficie, y se define como la relación entre la fuerza ejercida y el tamaño del área sobre el que se aplica. La temperatura y la presión definen o determinan el tipo de estado (sólido, líquido o gas) de una sustancia en condiciones de equilibrio.

El calor se puede definir como una forma de transmisión de energía que produce cambios de estado en las sustancias y que podemos observar de dos maneras: 1) mediante el intercambio de calor de forma sensible, cuando esta materia está en una sola fase (sólido, líquido o gas) y la cantidad de energía intercambiada varía la temperatura de esa sustancia; o 2) mediante el intercambio de calor de forma latente, cuando esta materia está en estado bifásico (líquido-vapor, sólido-líquido, etc.) y la cantidad de energía varía progresivamente el estado de la sustancia (condensa un gas a líquido, evapora un líquido a gas o fusiona un líquido a sólido) sin variar la temperatura del mismo.

La temperatura a la cual una sustancia sólida se convierte en líquido se llama temperatura de fusión. Durante la fusión la temperatura de la sustancia no cambia, todo el calor aplicado se emplea en cambiar la sustancia de sólida a líquida. Solo cuando la sustancia se ha fusionado, si se aplica un calor adicional a esta, su temperatura ulteriormente se elevará. Evidentemente cada sustancia tiene un punto de fusión único, característico y diferente al resto (el agua tiene un punto de fusión a los 0°C, mientras que el chocolate, por ejemplo, funde a los 26°C).

La temperatura a la cual una sustancia líquida pasa a vapor o viceversa a una determinada presión se denomina temperatura de ebullición. Si ponemos como ejemplo el agua a condiciones ambiente en estado líquido y la empezamos a calentar aplicando calor observaremos que su temperatura aumenta (calor sensible) hasta la temperatura de saturación a presión atmosférica (que es de 100°C), en estas condiciones si continuamos aplicando calor el agua hervirá a temperatura constante (calor latente) hasta evaporarse completamente. Si realizamos este calentamiento a una presión superior a la atmosférica, la temperatura de ebullición o saturación del agua será superior a 100°C y por el contrario si la presión es inferior a la atmosférica la temperatura de ebullición del agua será inferior a 100°C. Así cada sustancia tiene una temperatura de ebullición para cualquier presión dada (siempre que sea una sustancia pura y que esté en condiciones inferiores a las condiciones críticas y superiores al punto triple).

Si posteriormente continuamos calentando este vapor de agua, su temperatura continuará aumentando (calor sensible) en un proceso de recalentamiento. Aquí el calor específico es la cantidad de energía necesaria para incrementar un grado la temperatura de 1 kg de la masa. El proceso contrario al de evaporación (líquido a vapor) es el de condensación (de vapor a líquido), el proceso de disminución de temperatura (calor sensible) le denominamos subenfriamiento como proceso contrario al recalentamiento [2].

La Figura 1.1 muestra gráficamente estos procesos de cambio de fase comentados, en donde podemos observar esta evolución partiendo de la sustancia en condiciones de estado sólido. Los saltos de energía en las regiones bifásicas corresponden a los calores latentes de cambio de fase, mientras que las pendientes de las rectas en las zonas de una sola fase corresponden a la capacidad calorífica de la sustancia en los procesos de calor sensible [3].

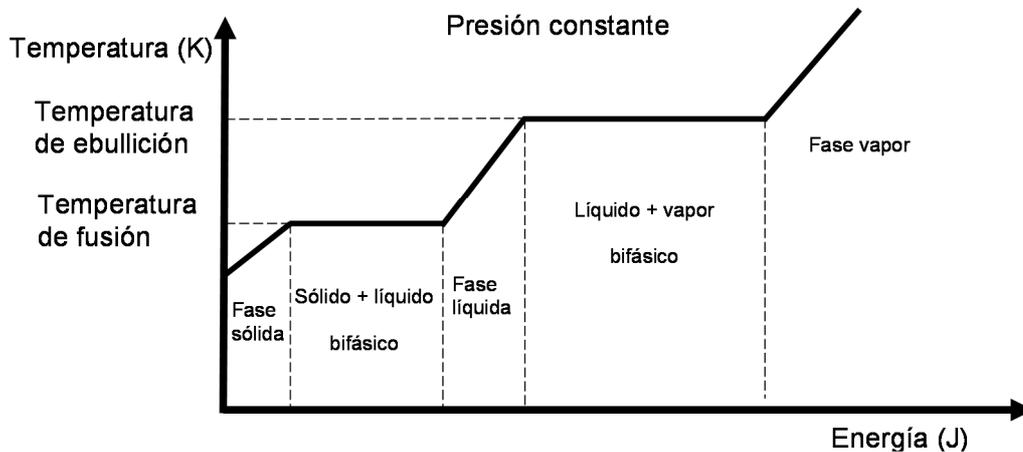


Figura 1.1 Proceso de cambio de estado de una sustancia pura.

Finalmente, solo comentar como aspecto final a esta introducción el concepto de trabajo. Podemos definir el trabajo como la energía que intercambia un sistema con el exterior debido al desplazamiento que generan las fuerzas externas al interactuar sobre dicho sistema. La potencia es el trabajo transferido por unidad de tiempo. Y así, el trabajo de compresión o expansión sobre un volumen es el producto de la fuerza exterior por la variación de volumen que experimenta.

En general, podemos describir el trabajo como el producto de una fuerza generalizada por un desplazamiento generalizado. En el caso de un trabajo de compresión o expansión el trabajo será el producto de la presión por la variación de volumen. En el caso de potencia que transmite un motor de compresión será el producto del par motor por la velocidad angular. En el caso de una batería sería el producto de la diferencia de potencial por la intensidad de corriente.

1.1.2 Diagrama P-h

El diagrama presión-entalpía es la representación gráfica entre los diferentes parámetros que definen las propiedades de un fluido en su trayectoria dentro de un ciclo frigorífico.