

**Luis Jutglar**  
**Ángel L. Miranda**

# **TÉCNICAS DE REFRIGERACIÓN**

# Índice

PRÓLOGO .....	1
---------------	---

## PARTE I - TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN

### CAPÍTULO 1

APLICACIONES DE LA REFRIGERACIÓN .....	7
1. Introducción .....	7
2. Refrigeración doméstica .....	8
3. Aire acondicionado .....	8
4. Refrigeración industrial .....	8
4.1 Industria química .....	8
4.2 Separación de gases .....	8
4.3 Almacenamiento de gases a baja presión .....	9
4.4 Control de procesos .....	9
4.5 Conservación de productos .....	9
4.6 Tratamiento en frío de los metales .....	9
4.7 Fabricación de hielo y de nieve carbónica .....	9
4.8 Deportes .....	9

### CAPÍTULO 2

MÉTODOS FRIGORÍFICOS .....	11
1. Introducción .....	11
2. Ciclos termodinámicos .....	13
2.1 Introducción .....	13
2.2 Coeficiente de eficiencia de una refrigeración .....	14
3. Principios de refrigeración .....	17
4. Métodos frigoríficos .....	22
4.1 Introducción .....	22
4.2 El ciclo de compresión de vapor. ....	22
4.3 Ciclos de absorción .....	22
4.4 Ciclos de gas .....	24
4.5 Refrigeración termoeléctrica .....	24

### CAPÍTULO 3

FLUIDOS FRIGORÍFICOS .....	25
1. Introducción .....	25
2. Resumen histórico .....	28
2.1 Introducción .....	28

## Técnicas de refrigeración

---

2.2 Los clásicos .....	29
2.3. La irrupción de Molina y Rowland .....	29
3. Clasificación .....	30
3.1 Introducción .....	30
3.2 Derivados halogenados saturados .....	31
3.3 Derivados halogenados insaturados .....	31
3.4 Mezclas zeotrópicas .....	31
3.5 Mezclas azeotrópicas .....	32
3.6 Hidrocarburos saturados .....	32
3.7 Hidrocarburos insaturados .....	32
3.8 Compuestos orgánicos no alquílicos .....	32
3.9 Compuestos inorgánicos .....	32
4. Identificación .....	32
4.1. Introducción .....	32
4.2. Standard 34 de ASHRAE .....	33
5. Propiedades de los refrigerantes .....	34
5.1 Introducción .....	34
5.2 Clasificación .....	34
5.3 Propiedades físicas .....	35
5.4 Propiedades químicas .....	35
5.4.1 Inflamabilidad .....	35
5.4.2 Toxicidad .....	35
5.4.3 Seguridad .....	36
5.4.4 Compatibilidad con la carga .....	36
5.4.5 Compatibilidad con los materiales .....	37
5.4.6 Compatibilidad con el aceite .....	37
5.4.7 Estabilidad .....	38
5.5 Propiedades termodinámicas .....	38
5.5.1 Introducción .....	38
5.5.2 Estados de un fluido frigorífico en un ciclo de compresión de vapor .....	38
5.5.3 Ecuación de estado .....	39
5.5.4 Determinación de la entalpía .....	40
5.5.5 Determinación de la entropía .....	41
5.5.6 Curva de tensión de vapor .....	41
5.6 Propiedades medioambientales .....	42
5.6.1 La capa de ozono .....	42
5.6.2 La radiación ultravioleta .....	43
5.6.3 El efecto invernadero .....	43
5.6.4 Índices relacionados con el medio ambiente .....	44
5.6.5 Normativa .....	45
CAPÍTULO 4	
CICLOS DE COMPRESIÓN DE VAPOR .....	47
1. Introducción .....	47

2. Características .....	48
3. El ciclo simple de compresión de vapor .....	48
4. Modificaciones del ciclo simple .....	52
4.1 Introducción .....	52
4.2 Multicompresión por etapas y con cámara de flash .....	54
4.3 Multicompresión en cascada .....	59
5. Otros ciclos de compresión de vapor. ....	63
5.1 Introducción .....	63
5.2 El ciclo transcrito .....	64

**CAPÍTULO 5**

CICLOS DE ABSORCIÓN .....	69
1. Introducción .....	69
2. Rendimiento teórico de la máquina de absorción .....	70
3. La máquina de absorción de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ .....	71
3.1 Introducción .....	71
3.2 Propiedades de las mezclas $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ .....	72
3.3 El ciclo tipo de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ .....	73
3.4 El ciclo mejorado de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ .....	78
4. La máquina de absorción de $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ .....	87
4.1 Introducción .....	87
4.2 Propiedades de las mezclas $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ .....	87
4.3 El ciclo tipo de $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ .....	89
4.4 El ciclo mejorado de $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ .....	92
5. Sistemas de tres componentes .....	97
6. La máquina de doble efecto .....	99
6.1 Introducción .....	99
6.2 Cálculo de las propiedades termodinámicas de los estados característicos .....	99
6.3 Balances de masa y de energía .....	101
6.3.1 Balance de masa en el absorbedor .....	101
6.3.2 Balance de masa en el generador de baja .....	102
6.3.3 Balances de energía .....	102
6.4 Conclusiones .....	105

**CAPÍTULO 6**

CICLOS DE GAS .....	107
1. Introducción .....	107
2. Ciclo de gas .....	109
2.1 Introducción .....	109
2.2 El ciclo simple ideal .....	110
2.3 El ciclo simple real .....	113
2.4 El ciclo regenerativo .....	115

## Técnicas de refrigeración

---

### CAPÍTULO 7

LICUEFACCIÓN DE GASES .....	119
1. Introducción .....	119
2. Método Linde .....	119
3. Método Claude .....	121
4. Conclusión .....	125

### CAPÍTULO 8

COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN DE COMPRESIÓN DE VAPOR ...	127
1. Introducción .....	127
2. Evaporador .....	127
2.1 Introducción .....	127
2.2 Clasificación .....	128
2.3 Temperaturas características .....	128
2.4 Coeficientes de transmisión de calor .....	129
3. Condensador .....	131
3.1 Introducción. ....	131
3.2 Utilización y clasificación. ....	132
3.3. Coeficiente global de medio de transmisión de calor. ....	133
4. Compresor .....	135
4.1 Introducción .....	135
4.2 Compresores alternativos .....	136
4.2.1 Introducción .....	136
4.2.2 Trabajo de compresión sobre el diagrama convencional indicado .....	137
4.2.3 Trabajos, rendimientos y potencias .....	140
4.2.4 Compresor adiabático .....	141
4.3 Compresores de tornillo .....	142
4.4 Compresión en etapas .....	142
4.5 Lubricantes .....	143
5. Sistemas de expansión .....	143
5.1 Introducción .....	143
5.2 La válvula de expansión termostática .....	143
5.3 La válvula de expansión a presión constante .....	144
5.4 La válvula de flotador .....	144
5.5 El tubo capilar .....	145
6. Curvas características .....	145
6.1 Introducción .....	145
6.2 El evaporador .....	146
6.3 Unidad condensadora .....	146
6.4 Funcionamiento conjunto .....	147

**PARTE II - CÁMARAS FRIGORÍFICAS**

<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>ASPECTOS GENERALES</b> .....	151
1. Introducción. ....	151
2. Transmisión de calor. ....	151
2.1 Introducción .....	151
2.2 Conducción. ....	152
2.2.1 Introducción .....	152
2.2.2 Conducción a través de una pared plana. ....	154
2.2.3 Conducción a través de una pared cilíndrica. ....	158
2.2.4 Conducción a través de una pared esférica. ....	161
2.3 Convección .....	161
2.3.1 Introducción .....	161
2.3.2 Convección natural sin cambio de estado. ....	162
2.3.3 convección forzada sin cambio de estado. ....	165
2.4 Radiación. ....	167
2.4.1 Conceptos básicos. ....	167
2.4.2 Intercambio de calor entre superficies radiantes. ....	169
2.5 Coeficiente global de transmisión de calor. ....	172
2.5.1 Introducción. ....	172
2.5.2 Coeficiente superficial convección-radiación. ....	173
2.5.3 Paredes planas: coeficiente global y distribución de temperaturas. ....	174
2.5.4 Paredes cilíndricas: coeficiente global y distribución de temperaturas. ....	177
2.5.5 Temperatura sol-aire .....	178
2.5.6 Puentes térmicos. ....	179
2.5.7 Transmisión de calor a través del suelo. ....	180
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>TRANSFERENCIA DE VAPOR</b> .....	183
1. Introducción .....	183
2. Conceptos básicos. ....	183
2.1 Presión parcial. ....	183
2.2 Tensión de vapor. ....	184
2.3 Humedad relativa y humedad absoluta. ....	185
2.4 Temperatura de rocío. ....	186
2.5 Entalpía del aire húmedo. ....	188
2.6 Volumen específico y densidad del aire húmedo. ....	188
2.7 Difusión de vapor a través de una pared plana. ....	190
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b> AISLAMIENTO TÉRMICO</b> .....	193
1. Introducción .....	193

## Técnicas de refrigeración

---

2. Tipos de aislantes térmicos. . . . .	193
3. Características de los aislantes térmicos. . . . .	194
4. Elección del aislante térmico. . . . .	198
5. Cálculo del espesor necesario de aislante. . . . .	198
5.1 Introducción . . . . .	198
5.2 Prevención de condensaciones superficiales. . . . .	198
5.3 Limitar el flujo de calor a un valor determinado. . . . .	200
5.4 Espesor óptimo económico. . . . .	201
5.5 Espesor óptimo energético. . . . .	204
5.6 Estimación de los grados día. . . . .	204
CAPÍTULO 4	
CÁMARAS Y ALMACENES FRIGORÍFICOS . . . . .	207
1. Introducción . . . . .	207
2. Clasificación. . . . .	207
3. Distribución general de un almacén frigorífico. . . . .	208
4. Tipos y estructura de los cerramientos. . . . .	209
4.1 Posición del aislamiento. . . . .	209
4.2 Solera. . . . .	211
4.3 Barreras de vapor. . . . .	212
5. Ventilación e infiltraciones. . . . .	213
6. Operaciones puntuales. . . . .	215
6.1 Introducción . . . . .	215
6.2 Congelación. . . . .	215
6.3 Descongelación. . . . .	216
6.4 Recepción, manipulación y entrega de producto. . . . .	217
7. Cálculo de la carga de refrigeración. . . . .	217
7.1 Introducción . . . . .	217
7.2 Carga debida a transmisión del exterior. . . . .	217
7.3 Carga debida al enfriamiento y congelación del producto. . . . .	222
7.4 Carga debida a ventilación e infiltraciones. . . . .	226
7.5 Carga debida a operarios. . . . .	227
7.6 Carga debida a fuentes internas de calor. . . . .	228
7.7 Carga total, sensible y latente. . . . .	229
7.8 Carga debida al descarche. . . . .	230
8. Potencia frigorífica. . . . .	231
8.1 Introducción . . . . .	231
8.2 Variación de la potencia demandada. . . . .	232
8.3 Inercia térmica del recinto. . . . .	232
8.4 Potencia instalada. . . . .	234
CONCLUSIONES . . . . .	237
BIBLIOGRAFÍA . . . . .	238
LISTA DE SÍMBOLOS . . . . .	240
ANEXO . . . . .	242