

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	9
NOMENCLATURA	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Justificación	13
1.2 Objetivos y alcance general de la tesis	15
1.3 Metodología	15
1.4 Organización del documento	16
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	17
2.1 Introducción	17
2.2 Clasificación de los modelos	18
2.2.1 Modelos Físicos	19
2.2.1.1 Modelos Estacionarios	19
2.2.1.2 Modelos Dinámicos	21
2.2.2 Modelos Empíricos o de caja negra	26
2.2.3 Resumen de la clasificación de modelos	28
2.3 Fundamentos Físicos Generales de los Componentes principales	29
2.3.1 Compresor	30
2.3.1.1 Análisis del proceso de compresión	32
2.3.2 Intercambiadores de Calor	35
2.3.3 Dispositivo de Expansión	39
2.4 Revisión Bibliográfica de los modelos dinámicos	42
2.4.1 Conclusiones de la revisión bibliográfica	49
2.5 Aplicaciones del modelado en los sistemas de compresión de vapor	51
2.6 Conclusiones del capítulo	52
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DINÁMICO	55
3.1 Objetivos	55
3.2 Aspectos generales del modelo	56
3.3 Metodología para el desarrollo del modelo	59
3.4 Modelo de los equipos de caudal másico del refrigerante	59
3.4.1 Modelo de la válvula de expansión	59
3.4.2 Modelo del compresor	61

3.5	Modelo de los intercambiadores de calor	64
3.5.1	Modelo dinámico del evaporador	66
3.5.1.1	Estructura de entradas y salidas del evaporador	67
3.5.1.2	Método de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) para el modelo del evaporador	67
3.5.1.3	Conservación de la masa del refrigerante: zona bifásica	68
3.5.1.4	Conservación de la masa del refrigerante: zona de recalentamiento	69
3.5.1.5	Conservación de la energía del refrigerante: zona bifásica	70
3.5.1.6	Conservación de la energía del refrigerante: zona de recalentamiento	71
3.5.1.7	Conservación de la energía en las paredes del tubo	72
3.5.1.8	Modelos para la temperatura del tubo del evaporador	74
3.5.1.9	Resolución del sistema de ecuaciones diferenciales: combinación algebraica de las ecuaciones del modelo	75
3.5.2	Modelo de la línea de descarga	78
3.5.2.1	Conservación de la masa: tubería de descarga del compresor	79
3.5.2.2	Conservación de la energía: tubería de descarga del compresor	80
3.5.2.3	Conservación de la energía: pared de la tubería de descarga	80
3.5.3	Modelo dinámico del condensador	82
3.5.3.1	Modos de operación	83
3.5.3.2	Método de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) para el modelo del condensador	85
3.5.3.2.1	Conservación de la masa del refrigerante: zona de vapor sobrecalentado	86
3.5.3.2.2	Conservación de la masa del refrigerante: zona bifásica	86
3.5.3.2.3	Conservación de la masa del refrigerante: zona de subenfriamiento	87
3.5.3.2.4	Conservación de la energía del refrigerante: zona de vapor sobrecalentado	87
3.5.3.2.5	Conservación de la energía del refrigerante: zona bifásica	87
3.5.3.2.6	Conservación de la energía del refrigerante: zona de subenfriamiento	88
3.5.3.2.7	Conservación de la energía en la pared del tubo	88
3.5.3.2.8	Modelos para la temperatura del tubo del condensador	89
3.5.3.3	Resolución del sistema de ecuaciones diferenciales para el condensador: combinación algebraica de las ecuaciones del modelo	91
3.5.4	Coefficientes de transferencia de calor por convección	93
3.5.4.1	Evaporador: zona de evaporación	93
3.5.4.2	Evaporador: zona de recalentamiento	97
3.5.4.3	Línea de descarga	98
3.5.4.4	Condensador: zona de vapor sobrecalentado	98
3.5.4.5	Condensador: zona de condensación	99
3.5.4.6	Condensador: zona de subenfriamiento	100
3.5.4.7	Resumen de las correlaciones aplicables	100
3.6	Fracción media de huecos	102
3.6.1	Fracción media de huecos obtenida a partir de la calidad del flujo	103
3.6.1.1	Expresiones del deslizamiento	103
3.6.1.2	Expresiones de la fracción media de huecos para los modelos homogéneo y de flujos separados.	105
3.6.2	Fracción media de huecos basada en la tasa de evaporación	106
3.6.2.1	Deslizamiento constante	106
3.6.2.2	Deslizamiento dependiente de la posición en la zona bifásica	109
3.6.3	Comparación entre las fracciones medias de huecos γ_{xz} y γ_{jz}	110
3.6.4	Derivada de la fracción media de huecos	112
3.6.4.1	Evaporador, caso 1e. Derivada de γ cuando $x_1 > 0$ y $x_2 = 1$, con zonas bifásica y de recalentamiento.	114
3.6.4.2	Evaporador, caso 1e'. Derivada de γ cuando $x_1=0$ y $x_2 = 1$, con zonas bifásica y de recalentamiento.	114
3.6.4.3	Evaporador, caso 2e. Derivada de γ cuando $x_1 > 0$ y $x_2 < 1$ (solo zona bifásica).	114

3.6.4.4	Condensador, caso 1c. Derivada de γ cuando $x_1 = 1$ y $x_2 = 0$, y con con tres zonas.	115
3.7	Modelos de los intercambiadores de calor según las expresiones de γ y $\dot{\gamma}$	116
3.7.1	Evaporador. Caso 1e, zonas bifásica y de recalentamiento, con $x_1 > 0$ y $x_2 = 1$.	116
3.7.2	Condensador. Caso 1c con tres zonas	117
3.8	Inicialización de los intercambiadores	118
3.8.1	Inicialización del evaporador	118
3.8.1.1	Inicialización sin válvula de expansión	118
3.8.1.2	Inicialización con válvula de expansión	119
3.8.1.3	inicialización del condensador	120
3.9	Solución del modelo del evaporador	121
3.9.1	Comparaciones a efectuar	122
3.9.2	Selecciones para la ejecución del modelo del evaporador	123
3.10	Solución del modelo del condensador	129
3.11	Conclusiones del capítulo	130
CAPÍTULO 4.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y ENSAYOS	131
4.1	Generalidades de la instalación	131
4.2	Circuitos principales de la instalación	132
4.2.1	Circuito frigorífico simple	132
4.2.2	Circuito secundario del evaporador	133
4.2.3	Circuito de disipación térmica del condensador	136
4.3	Elementos principales de la instalación	140
4.3.1	Compresor y botella de separación de aceite	140
4.3.2	Condensador	143
4.3.3	Válvula de expansión termostática	145
4.3.4	Evaporador	147
4.4	Instrumentación del banco de pruebas	148
4.4.1	Incertidumbre en las mediciones	153
4.5	Sistema de adquisición de datos (DAS)	154
4.6	Ensayos	156
4.7	Conclusiones del capítulo	157
CAPÍTULO 5.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELADO DE LOS COMPONENTES	159
5.1	Objetivo	159
5.2	Validación del modelado dinámico de los componentes	160
5.2.1	Validación del conjunto válvula de expansión-evaporador	160
5.2.1.1	Transitorios en el conjunto válvula de expansión-evaporador con la fracción media de huecos estándar γ_{xS}	161
5.2.1.2	Transitorios en el conjunto válvula de expansión-evaporador con γ_{JS}	178
5.2.2	Validación del conjunto evaporador-válvula aplicando la derivada de γ_{xS}	197

5.2.3 Validación del conjunto evaporador-válvula aplicando los modelos de la temperatura de la pared	201
5.2.4 Validación del compresor	203
5.2.5 Validación del condensador	204
5.3 Conclusiones del capítulo	209
CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO GLOBAL	211
6.1 Introducción	211
6.2 Submodelos del modelo global	211
6.2.1 Submodelo 1 del evaporador con válvula de expansión	211
6.2.2 Submodelo 2 para el compresor y las tuberías de aspiración y descarga.	212
6.2.3 Submodelo 3 para el condensador y la tubería de salida.	212
6.3 Acoplamiento e inicialización	212
6.4 Resolución del sistema global	213
6.5 Resultados	214
6.6 Conclusiones del capítulo	216
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	219
7.1 Conclusiones generales	219
7.2 Trabajos futuros	221
ANEXO A	223
Fracción local de huecos y deslizamiento	223
ANEXO B	227
Derivadas temporales de γ_{xS} y γ_{JS}	227
B.1) Ecuación para γ_{xS}^{1e}	227
B.2) Ecuación para γ_{JS}^{1e}	231
B.3) Ecuación para γ_{xS}^{1c}	234
ANEXO C	237
REFERENCIAS	239