

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes básicos . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	3
1.4. Alcances . . . . .	3
<b>2. Revisión Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1. Viabilidad de sistemas híbridos de bombas de calor geotérmicas con colectores solares térmicos . . . . .	4
2.2. Evaluación del desempeño y optimización de un sistema híbrido de calefacción	6
2.3. Aumento del COP de una bomba de calor geotérmica en una vivienda a través del uso de colectores solares térmicos . . . . .	8
2.4. Estudio del diseño de un sistema de bomba de calor geotérmica asistido por energía solar . . . . .	9
2.5. Estudios realizados en Chile . . . . .	11
<b>3. Antecedentes</b>	<b>15</b>
3.1. Demanda térmica de la vivienda . . . . .	15
3.1.1. Datos climatológicos . . . . .	15
3.1.2. Temperatura del subsuelo . . . . .	17
3.1.3. Intercambio de calor . . . . .	18
3.1.4. Balance energético . . . . .	24
3.1.5. Obtención de demanda térmica . . . . .	25
3.2. Diseño hidráulico . . . . .	25
3.2.1. Pérdidas de carga en tuberías . . . . .	25
3.2.2. Dimensionamiento vaso de expansión . . . . .	29
3.2.3. Aislación de tuberías . . . . .	30
3.3. Bombas de calor . . . . .	30
3.3.1. Fluidos refrigerantes . . . . .	34
3.3.2. Bombas de calor geotérmicas . . . . .	34
3.4. Intercambiador de calor geotérmico . . . . .	36
3.4.1. Intercambiadores de calor geotérmicos horizontales . . . . .	37
3.4.2. Fundamentos térmicos del diseño de intercambiadores horizontales . . . . .	42
3.5. Sistema de distribución . . . . .	49
3.5.1. Fundamentos térmicos de diseño y cálculo de piso radiante . . . . .	50
3.6. Colectores solares . . . . .	54

3.6.1.	Fundamentos térmicos de diseño del sistema solar térmico . . . . .	56
3.7.	Caldera a Gas . . . . .	63
3.7.1.	Aspectos térmicos del sistema de calefacción por caldera a gas . . . . .	65
3.8.	Evaluación del coeficiente de desempeño estacional de un sistema de calefacción . . . . .	67
3.9.	Análisis económico: Análisis de Costos del Ciclo de Vida . . . . .	67
<b>4.</b>	<b>Metodología</b>	<b>72</b>
4.1.	Recopilación bibliográfica para el desarrollo del trabajo . . . . .	72
4.2.	Definición de localidad de estudio . . . . .	72
4.3.	Variables climáticas . . . . .	72
4.3.1.	Software TRNSYS . . . . .	73
4.3.2.	Información climática . . . . .	74
4.4.	Determinación de la vivienda . . . . .	74
4.5.	Modelación de la vivienda . . . . .	76
4.6.	Determinación de la demanda de calefacción transiente de la vivienda . . . . .	79
4.6.1.	Temperatura de requerimiento . . . . .	80
4.7.	Selección y modelación de la bomba de calor . . . . .	81
4.7.1.	Selección del equipo . . . . .	81
4.7.2.	Modelación de la bomba de calor . . . . .	83
4.8.	Diseño y modelación de sistema de captación geotérmico . . . . .	85
4.8.1.	Criterios de diseño . . . . .	85
4.8.2.	Cálculo del largo del colector geotérmico y datos de diseño del sistema de captación . . . . .	86
4.8.3.	Equipos considerados e instalación . . . . .	90
4.8.4.	Modelación del sistema de captación geotérmico . . . . .	92
4.9.	Diseño y modelación de sistema de distribución . . . . .	93
4.9.1.	Criterios de diseño . . . . .	93
4.9.2.	Diseño del piso radiante . . . . .	94
4.9.3.	Equipos considerados e instalación . . . . .	95
4.9.4.	Modelación del piso radiante . . . . .	98
4.10.	Diseño y modelación del sistema solar . . . . .	99
4.10.1.	Criterios de diseño . . . . .	99
4.10.2.	Diseño del sistema . . . . .	100
4.10.3.	Equipos considerados e instalación . . . . .	101
4.10.4.	Modelación del sistema solar . . . . .	102
4.11.	Diseño y modelación del sistema convencional . . . . .	104
4.11.1.	Criterios de diseño . . . . .	104
4.11.2.	Diseño del sistema . . . . .	104
4.11.3.	Equipos constituyentes e instalación . . . . .	105
4.11.4.	Modelación del sistema convencional . . . . .	105
4.12.	Sistemas de calefacción modelados . . . . .	106
4.13.	Análisis de sensibilidad . . . . .	111
4.13.1.	Datos de partida y variables . . . . .	111
4.14.	Evaluación técnica-económica . . . . .	118
<b>5.</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>122</b>
5.1.	Condiciones climáticas en Melipilla . . . . .	122

5.2.	Demanda de calefacción . . . . .	126
5.3.	Resultados sistemas de diseño . . . . .	129
5.4.	Análisis de sensibilidad y evaluación técnica . . . . .	142
5.4.1.	Coeficiente de desempeño de los sistemas diseñados . . . . .	142
5.4.2.	Comparación del confort térmico entre los distintos sistemas diseñados	145
5.4.3.	Ahorro consumo de energía de sistemas híbridos y no híbridos con respecto a caso convencional . . . . .	152
5.5.	Análisis de sensibilidad y evaluación económica . . . . .	155
5.5.1.	Inversión . . . . .	155
5.5.2.	Costo anual por consumo de energía . . . . .	159
5.5.3.	Costo anual por mantenciones . . . . .	161
5.5.4.	Ahorros totales de costos de operación respecto a caso base . . . . .	164
5.5.5.	Cálculo del costo de ciclo de vida (LCC) . . . . .	166
5.5.6.	Ahorro neto de los sistemas diseñados con respecto a caso base . . . . .	169
5.5.7.	Relación entre ahorro e inversión de todos los sistemas diseñados con respecto al sistema convencional . . . . .	171
5.5.8.	Relación ahorro/inversión versus porcentaje de confort térmico de sistemas híbrido y geotérmico no híbrido con respecto a sistema convencional	173
<b>6.</b>	<b>Discusión y Conclusiones</b>	<b>174</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>180</b>
	<b>Anexos</b>	<b>186</b>
	<b>A. Cálculo de radiación en superficie inclinada</b>	<b>187</b>
	<b>B. Cálculo de resistencia térmica de intercambiadores horizontales</b>	<b>191</b>
	<b>C. Selección de diámetro y fluido anticongelante para colectores geotérmicos</b>	<b>194</b>
	<b>D. Dimensionamiento de los espesores de las tuberías del sistema de calefacción</b>	<b>196</b>
	<b>E. Matriz de desempeño bomba de calor</b>	<b>198</b>
	<b>F. Cotizaciones de los insumos de los sistemas</b>	<b>200</b>