

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Optimización energética de la envuelta e instalaciones del C.E.I.P. Concepción Estevarena

Autora: Irene Vázquez Maestre

Tutores: Servando Álvarez Domínguez

Laura Romero Rodríguez

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Optimización energética de la envuelta e instalaciones del C.E.I.P. Concepción Estevarena

Autora:

Irene Vázquez Maestre

Tutores:

Servando Álvarez Domínguez

Laura Romero Rodríguez

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Optimización energética de la envuelta e instalaciones del C.E.I.P. Concepción Estevarena

Autora: Irene Vázquez Maestre
Tutores: Servando Álvarez Domínguez
Laura Romero Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer la pasión y el empeño que ponen los profesores con los que he tenido la suerte de coincidir a lo largo de estos 20 años como estudiante. Aquellos que no, me han hecho aprender a superarme con cada asignatura.

Especialmente, agradecer a Servando la oportunidad de realizar este proyecto y destacar su dedicación y paciencia con los estudiantes, siempre ha sido un placer acudir a sus clases y tutorías.

De la misma manera, me es necesario agradecer a Laura su eterna paciencia y su ayuda en todo momento. Es digno de admiración la constancia y el esfuerzo en todo lo que hace.

Personalmente, me gustaría agradecer a mi familia el apoyo y la fe que siempre han puesto cada uno de ellos en mí, siempre han sabido que llegaría este día antes que yo. Han celebrado mis aprobados y han sufrido mis suspensos y noches en vela como los que más. No estaría aquí sin ellos.

Asimismo, hay una segunda familia que han hecho este camino mucho más fácil y ameno. Me siento orgullosa de haber compartido clases y años de aprendizaje con ellos, no es fácil encontrar gente en quién apoyarse en un mundo tan competitivo, y yo puedo decir que he tenido esa suerte. Y dentro de esa gran familia, hay una persona especial, que conocí gracias a la carrera, el principal apoyo con el que he compartido cada minuto de estos años de universidad y con el que espero seguir compartiendo muchos años más de vida.

Especialmente, por todo lo que nos une, tanto a nivel personal como en lo presente, quiero agradecer a Sonia el haber podido compartir con ella la elaboración de este proyecto, siempre ha tenido la capacidad de conseguir que las cosas con ella sean mucho más sencillas y divertidas. Eres luz.

Irene Vázquez Maestre

Sevilla, 2019

Resumen

El enfoque principal de este proyecto consiste en el análisis de mejora energética de un centro educativo en la localidad de Sevilla, teniendo como objetivo la máxima reducción posible del consumo de energía. Para ello, se analizarán los datos reales del centro, como son la demanda energética inicial o los equipos que componen la instalación de climatización.

Una vez conocida la situación inicial se plantean dos líneas de mejora. En primer lugar, se analizará la demanda y se estudiarán las posibilidades de actuación. Con lo cual, las primeras modificaciones en el centro tendrían lugar en la envolvente del edificio. Mediante el cálculo a través de un modelo simplificado y el análisis del Coste de Ciclo de Vida, se hallará la opción óptima económica y energética en cuanto a reducción de demanda.

En segundo lugar, se analizará la instalación existente de climatización y se estudiará la implementación de ciertas modificaciones. El objetivo principal será añadir y modificar los equipos existentes con el fin de conseguir una producción de energía lo más eficiente posible. Para el análisis y validación de la instalación se hará uso del software TRNSYS, que es capaz de realizar un análisis transitorio detallado en paso de tiempo corto. Al igual que en la primera parte del proyecto, mediante el análisis en base al Coste de Ciclo de Vida se llevará a cabo el dimensionamiento de dichos equipos.

Una vez implementadas ambas medidas tanto a nivel de envolvente para la reducción de demanda como a nivel de instalación para reducción de consumos, se obtendrá un edificio renovado y más eficiente, acercándolo así al objetivo de un modelo de edificio de consumo energético casi nulo.

Abstract

The main focus of this project is the analysis of energy improvement of an educational center in Seville with the maximum possible reduction of energy consumption as its objective. To do this, the real data of the center are analyzed, such as the initial energy demand or the equipment needed for the air conditioning installation.

Once the initial situation is known, two lines of improvement are proposed. Firstly, demand data is analyzed and the possibilities for improvement are studied. This implies that the first modifications in the center would take place in the envelope of the building. By means of the calculation through a simplified model and the analysis by means of the cost of life cycle, the optimal economic and energetic option is found in terms of demand reduction.

Secondly, the existing air conditioning installation is analyzed and the implementation of certain modifications is studied. The main objective is to add and modify existing equipment in order to achieve the most efficient production of energy. For the analysis and validation of the installation, the TRNSYS software will be used through detailed transient analysis in a short time step. As in the first part of the project, through the analysis based on the life cycle cost, the sizing of said equipment is carried out.

Once both measures have been implemented, both at the envelope level for demand reduction and at the installation level for consumption reduction, a renovated and more efficient building model will be obtained, thus bringing it closer to the objective of a nearly zero energy building model.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxv
1 Introducción	1
1.1 <i>Motivación del Proyecto</i>	1
1.2 <i>Situación actual de la estructura energética</i>	1
1.3 <i>Edificio de consumo energético casi nulo (nZEB)</i>	2
2 Edificio Objeto	5
2.1 <i>Definición del edificio</i>	6
2.1.1 <i>Descripción geométrica</i>	6
2.1.2 <i>Descripción constructiva</i>	7
2.1.3 <i>Descripción operacional</i>	10
2.1.4 <i>Zona climática</i>	10
2.2 <i>Demanda de calefacción</i>	11
2.3 <i>Demanda de refrigeración</i>	15
2.4 <i>Demanda de iluminación</i>	16
2.5 <i>Demanda de agua caliente sanitaria (ACS)</i>	17
3 Reducción de la demanda energética	19
3.1 <i>Situación inicial</i>	19
3.2 <i>Definición de las propuestas de mejora</i>	20
3.2.1 <i>Mejora del aislamiento de los cerramientos</i>	20
3.2.2 <i>Mejora de la calidad de las ventanas</i>	22
3.2.3 <i>Tratamiento de puentes térmicos</i>	22
3.2.4 <i>Control de la estanqueidad</i>	23

3.2.5	Estrategias de ventilación nocturna	23
3.3	<i>Cálculo del Coste de Ciclo de Vida (CCV)</i>	24
4	Situación de mínima demanda energética	25
4.1	<i>Elección del caso óptimo</i>	25
4.2	<i>Características de la situación óptima</i>	27
4.3	<i>Implementación del caso óptimo en HULC</i>	28
5	Edificio en oscilación libre	29
6	Instalaciones de Climatización y ACS	31
6.1	<i>Instalación inicial</i>	31
6.1.1	Caldera convencional de agua caliente	31
6.1.2	Tanque de almacenamiento	32
6.1.3	Bombas hidráulicas	33
6.1.4	Funcionamiento de la instalación inicial	34
6.2	<i>Instalación propuesta</i>	35
6.2.1	Bomba de calor	36
6.2.2	Funcionamiento de la instalación propuesta	36
6.2.3	Diagrama de flujo	36
7	Modelado de la instalación	39
7.1	<i>Introducción</i>	39
7.2	<i>Implementación de la instalación en TRNSYS</i>	40
7.2.1	Caldera convencional	40
7.2.2	Bomba de calor	42
7.2.3	Tanques de almacenamiento	44
7.3	<i>Funcionamiento de la instalación en TRNSYS</i>	45
7.3.1	Lazo de calefacción	46
7.3.2	Lazo de agua caliente sanitaria	48
7.4	<i>Verificación del modelo</i>	50
8	Optimización de la Instalación	53
8.1	<i>Consumo de la caldera en función de la instalación</i>	53
8.2	<i>Catálogo de alternativas para la instalación propuesta</i>	57
8.2.1	Definición de las diferentes alternativas	57
8.2.2	Análisis de los resultados de las combinaciones	57
8.3	<i>Comparativa entre simulaciones</i>	64
8.4	<i>Evaluación de costes</i>	90
8.4.1	Bomba de calor	90
8.4.2	Tanques de almacenamiento	92

8.5	<i>Elección del caso óptimo</i>	93
8.5.1	Consumo de energía primaria	93
8.5.2	Generación de resultados	94
8.5.3	Zona de óptimos	99
9	Instalación óptima	103
9.1	<i>Valores límites según la normativa</i>	103
10	Conclusiones	109
	Bibliografía	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficies y orientaciones de los cerramientos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	6
Tabla 2. Composición de fachada. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	7
Tabla 3. Composición de cubierta. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	8
Tabla 4. Composición de cerramiento en contacto con el terreno. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	8
Tabla 5. Composición de partición interior horizontal. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	9
Tabla 6. Composición de partición interior vertical. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	9
Tabla 7. Composición de hueco. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	9
Tabla 8. Régimen de funcionamiento del edificio. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	10
Tabla 9. Coeficientes correctores. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	14
Tabla 10. Parámetros iniciales constructivos del edificio. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	19
Tabla 11. Mejora de aislamiento en muros. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	21
Tabla 12. Mejora de aislamiento en cubierta. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	21
Tabla 13. Mejora de aislamiento en suelos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	22
Tabla 14. Mejora de calidad de ventanas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	22
Tabla 15. Tratamiento de puentes térmicos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	23
Tabla 16. Control de la estanqueidad. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	23
Tabla 17. Estrategias de ventilación nocturna propuestas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	24
Tabla 18. Características de la situación óptima. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	27
Tabla 19. Comparación entre demanda óptima y demanda inicial. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	27
Tabla 20. Característica de la caldera. <i>Fuente: Auditoría del centro.</i>	32
Tabla 21. Combinaciones para el dimensionamiento de la instalación. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	57
Tabla 22. Distribución de las características de la zona de óptimos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	100
Tabla 23. Comparación de las instalaciones. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista aérea del centro. <i>Fuente: Google Maps.</i>	5
Figura 2. Plano de la planta alta del edificio. <i>Fuente: Auditoría del centro.</i> [2].....	5
Figura 3. Temperatura media en Sevilla. <i>Fuente: Weather Atlas.</i> [3].....	10
Figura 4. Precipitación media en Sevilla. <i>Fuente: Weather Atlas.</i> [3].....	11
Figura 5. Mapa de zonas climáticas. <i>Fuente: Temario de la asignatura ADE.</i>	11
Figura 6. Pérdidas en régimen de calefacción. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	13
Figura 7. Ganancias en régimen de refrigeración. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	13
Figura 8. Demanda de calefacción horaria. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	14
Figura 9. Demanda de calefacción. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	15
Figura 10. Demanda de refrigeración. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	16
Figura 11. Distribución de luminarias por tecnología. <i>Fuente: Auditoría del centro.</i> [2].....	16
Figura 12. Distribución de potencias por tecnología. <i>Fuente: Auditoría del centro.</i> [2].....	17
Figura 13. Demanda diaria de ACS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	18
Figura 14. Demanda anual de ACS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	18
Figura 15. Calificación energética según índice. <i>Fuente: Temario de la asignatura ADE.</i>	20
Figura 16. Ejemplo del efecto de aislamiento en opacos. <i>Fuente: Temario de la asignatura ADE.</i>	21
Figura 17. Catálogo de mejoras. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	26
Figura 18. Comparación de los resultados de reducción de la demanda de calefacción. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	28
Figura 19. Temperatura del edificio en oscilación libre. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	29
Figura 20. Funcionamiento de caldera convencional. <i>Fuente: Multiservice Group.</i> [6].....	32
Figura 21. Funcionamiento de tanque de almacenamiento con serpentín. <i>Fuente: Ivar-Group.</i> [7].....	33
Figura 22. Bomba hidráulica. <i>Fuente: Calfri.</i> [8].....	34

Figura 23. Esquema de funcionamiento de la instalación inicial. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	35
Figura 24. Esquema de funcionamiento de la instalación propuesta. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	36
Figura 25. Diagrama de flujo de la instalación propuesta. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	38
Figura 26. Definición de la curva de rendimiento de la caldera. <i>Fuente: Manual de curvas CALENER.</i>	41
Figura 27. Rendimiento de caldera convencional. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	41
Figura 28. Definición de ecuaciones de la caldera en TRNSYS. <i>Fuente: TRNSYS Simulation Studio.</i>	41
Figura 29. Definición de la curva de rendimiento de la bomba de calor. <i>Fuente: Manual de curvas CALENER.</i>	43
Figura 30. Rendimiento de bomba de calor. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	43
Figura 31. Definición de ecuaciones de la bomba de calor en TRNSYS. <i>Fuente: TRNSYS Simulation Studio.</i> ..	44
Figura 32. Esquema de la instalación en TRNSYS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	46
Figura 33. Esquema del lazo de calefacción en TRNSYS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	47
Figura 34. Definición de las señales en TRNSYS. <i>Fuente: TRNSYS Simulation Studio.</i>	47
Figura 35. Definición de las señales de los radiadores en TRNSYS. <i>Fuente: TRNSYS Simulation Studio.</i>	48
Figura 36. Esquema del lazo de agua caliente sanitaria en TRNSYS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	49
Figura 37. Balance mensual de la instalación. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	51
Figura 38. Balance diario de la instalación. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	51
Figura 39. Consumo mensual de la caldera para cada alternativa. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	54
Figura 40. Consumo mensual de la caldera en la instalación inicial. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	55
Figura 41. Consumo mensual de la caldera en la instalación propuesta. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	55
Figura 42. Consumo mensual de la caldera con los valores iniciales de demanda. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	56
Figura 43. Consumo mensual de la caldera con los valores de demanda reducida. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	56
Figura 44. Consumo de la caldera en función del volumen del tanque de ACS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i> ..	58
Figura 45. Consumo de la caldera en función de la potencia de la BDC. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	59
Figura 46. Consumo de la BDC en función del volumen de ACS. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	60
Figura 47. Consumo de la caldera en función del volumen de la BDC. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	61
Figura 48. Consumo de la BDC en función del volumen de la BDC. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	62
Figura 49. Consumo de la BDC en función de su potencia nominal. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	63

Figura 50. Consumo de la BDC en función de su rendimiento nominal. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	64
Figura 51. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción con potencia de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	65
Figura 52. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción con potencia de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	66
Figura 53. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con potencia de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	67
Figura 54. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con potencia de BDC variable acotada. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	68
Figura 55. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con potencia de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	68
Figura 56. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con potencia de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	69
Figura 57. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con potencia de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	70
Figura 58. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de ACS variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	71
Figura 59. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de ACS variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	71
Figura 60. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	72
Figura 61. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	73
Figura 62. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS de 2 y 12 m ³ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	74
Figura 63. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS de 2 y 12 m ³ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	74
Figura 64. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de ACS variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	75
Figura 65. Evolución diaria de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de ACS variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	76
Figura 66. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	77

Figura 67. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	77
Figura 68. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	78
Figura 69. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	78
Figura 70. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC de 2 m ³ y 20 m ³ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	79
Figura 71. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC de 2 m ³ y 20 m ³ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	79
Figura 72. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	80
Figura 73. Evolución diaria de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC variable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	81
Figura 74. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC de 2 m ³ y 20 m ³ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	82
Figura 75. Evolución diaria de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC de 2 m ³ y 20 m ³ . <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	82
Figura 76. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción en Febrero. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	83
Figura 77. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción en Febrero. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	84
Figura 78. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción en Noviembre. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	85
Figura 79. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción en Noviembre. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	85
Figura 80. Evolución diaria de la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria en Febrero. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	86
Figura 81. Evolución diaria de la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria en Noviembre. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	86
Figura 82. Evolución semanal de las temperaturas del tanque de agua caliente sanitaria en diferentes periodos del año. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	87

Figura 83. Evolución diaria de las temperaturas del tanque de agua caliente sanitaria en diferentes periodos del año. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	88
Figura 84. Evolución semanal de las temperaturas del tanque de la bomba de calor en diferentes periodos del año. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	89
Figura 85. Evolución diaria de las temperaturas del tanque de la bomba de calor en diferentes periodos del año. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	89
Figura 86. Costes de inversión de la bomba de calor. <i>Fuente: Temario de la asignatura ADE.</i>	91
Figura 87. Costes de inversión de los tanques de almacenamiento. <i>Fuente: Temario de la asignatura ADE.</i> ..	92
Figura 88. Factores de paso a energía primaria. <i>Fuente: HULC.</i>	94
Figura 89. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	95
Figura 90. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria total. <i>Fuente: Elaboración propia.</i> .	95
Figura 91. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función del rendimiento de la bomba de calor. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	96
Figura 92. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función de la potencia de la bomba de calor. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	97
Figura 93. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función del volumen del tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	98
Figura 94. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función del volumen del tanque de almacenamiento de la bomba de calor. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	99
Figura 95. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en la zona de óptimos. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	101
Figura 96. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en la zona de óptimos ampliado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	101
Figura 97. Límites en el consumo de energía primaria no renovable. <i>Fuente: Documento Básico de Ahorro de Energía.</i>	103
Figura 98. Límites en el consumo de energía primaria total. <i>Fuente: Documento Básico de Ahorro de Energía.</i>	103
Figura 99. Limitación de la normativa en consumo de energía primaria no renovable. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	104
Figura 100. Limitación de la normativa en consumo de energía primaria total. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	105
Figura 101. Preselección de combinaciones óptimas. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	105

Figura 102. Aumento en la zona de óptimos. *Fuente: Elaboración propia.* 106

Figura 103. Selección de la combinación óptima. *Fuente: Elaboración propia.* 106

NOTACIÓN

HULC	Herramienta Unificada Lider Calener
CCV	Coste de Ciclo de Vida
CTE	Código Técnico de la Edificación
ISO	International Organization for Standardization
DB-HE	Documento Básico de Ahorro de Energía
ACS	Agua Caliente Sanitaria
ADE	Ahorro en Demanda de Energía
CEE	Comunidad Económica Europea
EEUU	Estados Unidos
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
TESS	Thermal Energy Systems Specialists
BDC	Bomba de Calor
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
TRNSYS	Transient System Simulation Program

1 INTRODUCCIÓN

La energía y persistencia conquistan todas las cosas.

- Benjamin Franklin -

1.1 Motivación del Proyecto

El objetivo del proyecto es el estudio de la implementación de mejoras energéticas en edificación. Este propósito está motivado por alcanzar los objetivos energéticos requeridos por la normativa vigente, así como por la voluntad de obtener una reducción significativa en el consumo de energías no renovables.

Para ello, se ha seleccionado un edificio terciario representativo en España en el que estudiar las posibilidades de reducción de demanda modificando ciertos elementos constructivos del mismo. Asimismo, también se procederá a evaluar la capacidad de mejora de los elementos de consumo existentes en el edificio mediante la sustitución de los equipos presentes en el centro por equipos de menor consumo o consumo parcialmente renovable.

Para evaluar dichas mejoras, se estudian las diferentes alternativas posibles en lo que a la modificación de los elementos constructivos respecta y se selecciona la combinación que optimice la demanda energética del edificio. En el caso de la evaluación de la capacidad de mejora de los elementos de consumo, se procederá al diseño de una nueva instalación, más eficiente que la existente, y se optimizarán las principales variables que la definen, como son la potencia de los equipos generadores o la capacidad de los equipos almacenadores.

Así, se espera alcanzar el objetivo principal del proyecto que se mencionaba anteriormente, como son alcanzar tanto los objetivos energéticos requeridos por normativa como una reducción significativa en el consumo de energías no renovables.

1.2 Situación actual de la estructura energética

Actualmente el mundo se encuentra en plena transición hacia un uso más eficiente de la energía. Es alrededor de los años 80 con la crisis petrolera cuando comienzan a aparecer las primeras políticas para impulsar el ahorro y un uso más eficiente de la energía.

Sin embargo, a día de hoy, esas políticas siguen sin ser suficientes. Diversos informes realizados por organismos como la Agencia Internacional de la Energía, la Comisión Europea o el Departamento de Energética de los Estados Unidos confirman que las necesidades energéticas a nivel mundial continúan aumentando de forma inexorable, así como la dependencia de combustibles fósiles. Se avisa sobre la necesidad de que los gobiernos modifiquen sus políticas energéticas para, entre otras cosas, frenar las emisiones de CO₂.

Desde los años 80, hay una tendencia de incorporación de energías renovables, eólica y solar principalmente, en el mix energético global además de la hidráulica ya presente desde comienzos del siglo XX. Sin embargo, aunque la incorporación de energías renovables está en aumento, el consumo mundial de energía primaria también crece a razón de un 1.8% anual.

La combinación de ambas situaciones como son el aumento de la demanda de energía a nivel mundial debido al aumento de la población y al incremento en el nivel de vida de una parte significativa del planeta, acompañado del agotamiento de los combustibles fósiles augura una situación futura muy desfavorable.

Según la Agencia Internacional de la Energía, se hace necesaria la incorporación de fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles en un período de tiempo no superior a los 50 años.

Es por ello que resulta indispensable impulsar la elaboración de proyectos que favorezcan las energías renovables y la implantación de sistemas más eficientes en todos los ámbitos. Cambiar de modelo energético es un problema global y buena prueba de ello es que las principales potencias industriales del mundo están haciendo un enorme esfuerzo inversor para propiciar transiciones energéticas en sus respectivos países hacia un mix sostenible e independiente de los combustibles fósiles. Este cambio es inevitable, ya está en marcha en numerosos países y aquellos que primero sepan adaptarse, serán quienes podrán liderar ese cambio y exportar sus ideas y productos al resto.

La industria energética cambiará gradualmente hacia las energías renovables y la eficiencia energética y el período de transición vendrá fuertemente determinado por las inversiones que se realicen en estas fuentes de energía, tanto por parte del capital público como del privado.

Es en este punto donde radica la importancia de llevar a cabo proyectos como el que se plantea en este Trabajo de Fin de Grado, propiciando la mejora de los procesos energéticos y fomentando el uso de energías renovables y más eficientes.

1.3 Edificio de consumo energético casi nulo (nZEB)

Según la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de Mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, se define edificio de consumo energético casi nulo como *edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, que se determinará de conformidad con el anexo I (Directiva 2010/31/UE). La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia*

medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno. [1]

Como establece la Directiva 2010/31/UE, cada país miembro debe realizar su propia definición del concepto de nZEB, teniendo en cuenta sus condicionantes propios, en base a la metodología de coste óptimo proporcionada por la UE. Esta metodología requiere de los siguientes procesos:

- ✓ Definición de edificios de referencia, sobre los que aplicar la metodología sobre los que administrar la metodología de coste óptimo, en función de la tipología: Residencial – No Residencial
- ✓ Definición de las medidas de eficiencia energética que deben evaluarse. Se realizarán estimaciones calculando la energía consumida anualmente para satisfacer las demandas térmicas (Calefacción, refrigeración, y ACS) ligadas a un uso normal. Y estas medidas se expresarán como un indicador numérico. La definición debe incluir un indicador numérico de uso de energía primaria expresado en términos de energía anual por unidad de superficie ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{año}$), que se entiende debe ser de origen renovable.
- ✓ Cálculo de los costes de las medidas de eficiencia durante todo el ciclo de vida útil del edificio.

En España, la Normativa en vigor que tiene en cuenta la eficiencia energética de los edificios, es básicamente la que se define en el Código Técnico de la Edificación (CTE). En dicho Documento se establecen unos límites de demanda de calefacción, refrigeración y consumo de energía primaria, los cuales se han establecido de acuerdo con los parámetros definidos en el año 2013.

Si bien, desde el punto de vista de cumplimiento normativo, con estas definiciones parece que se está dando respuesta a la directiva 2010/31/UE, estudiando en profundidad la exigencia de la misma, los parámetros que tiene en cuenta y el fin que persigue, todo parece indicar que el CTE, en concreto su Documento Básico DB-HE, que tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir las Exigencias Básicas de ahorro de energía (y en particular, en sus Exigencias Básicas “HE0 Limitación del consumo energético” y “HE1 Limitación de la demanda energética”), no es la mejor respuesta a esta Directiva si realmente se quiere conseguir una reducción drástica de las emisiones de los gases de efecto invernadero que emiten los edificios.

Y, desde luego, de ningún modo, con los valores definidos en las Exigencias Básicas del CTE DB-HE0 y DB-HE1 vigente actualmente, se puede conseguir de una forma económicamente viable un edificio de balance energético cero, es decir, un edificio autosuficiente y autónomo energéticamente hablando, que es, sin lugar a duda, el horizonte que pretende conseguir la UE con la publicación de la Directiva 2010/31/UE.

Por tanto, desde la propia Directiva, y a tenor de lo establecido en la misma, así como de lo observado en el objetivo perseguido, se entiende que los valores límites de consumo de energía primaria, calefacción y refrigeración, deben ser lo más bajos posibles, dentro de rangos económicamente viables, para su ejecución. Y bien podrían ser los establecidos por el método, que, según todos los indicios, ha inspirado a la Directiva 2010/31/UE, para la definición de un Edificio de Consumo Casi Nulo.

En este estudio, se pretende analizar en profundidad la capacidad de mejora de un edificio terciario situado en España de manera que cumpla con la normativa establecida en el marco legal español. Adicionalmente, se optimizará su funcionamiento todo lo posible para intentar alcanzar la categoría de Edificio de Consumo Energético Casi Nulo de acuerdo con la normativa que estará vigente próximamente.

2 EDIFICIO OBJETO

El edificio objeto a estudiar es un centro educativo denominado *C.E.I.P. Concepción Estevarena* (anteriormente *C.E.I.P. Joaquín Benjumea Burín*), localizado en Av. Ciudad de Chiva 10, en la localidad de Sevilla. El edificio objeto cuenta con una superficie útil de 2857.37 m² distribuidos en dos plantas sobre rasante.



Figura 1. Vista aérea del centro. Fuente: Google Maps.

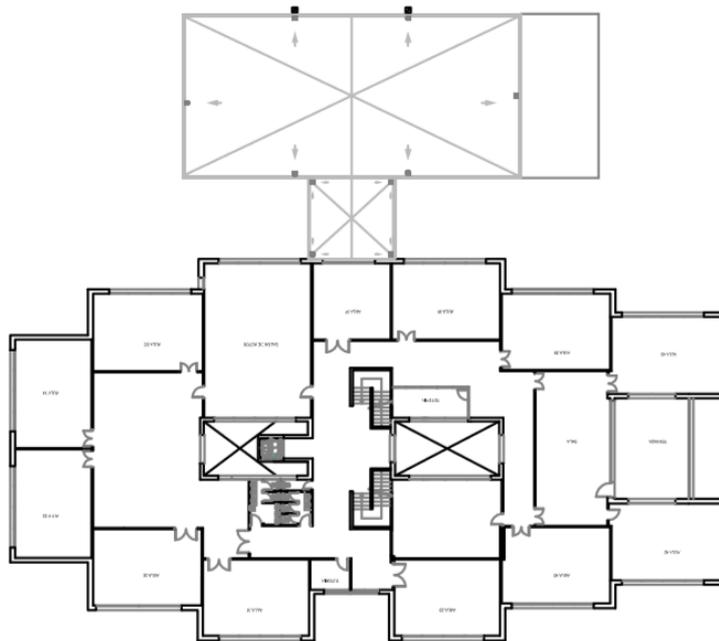


Figura 2. Plano de la planta alta del edificio. Fuente: Auditoría del centro. [2]

El centro consta de dos patios y de un gimnasio auxiliar con sus correspondientes vestuarios, de donde proviene principalmente la demanda de agua caliente sanitaria. Asimismo, además de los equipos de climatización para las aulas y las zonas comunes, el centro cuenta con equipos como ordenadores, impresoras, televisores, equipos de música así como los equipos de iluminación que se detallarán posteriormente.

La ocupación aproximada del centro es de 650 personas. Dicha aproximación se ha llevado a cabo contando el número de aulas existentes en el centro y aproximando la media de alumnos que suele haber por aula en los centros educativos.

2.1 Definición del edificio

2.1.1 Descripción geométrica

La descripción geométrica de un edificio es necesario conocerla para poder llevar a cabo un correcto análisis de este. Las orientaciones y las superficies de los distintos cerramientos que componen el edificio se muestran a continuación:

TIPO	ORIENTACIÓN	SUPERFICIE (m ²)
Fachadas	Norte	428.5
	Noreste	-
	Este	253.0
	Sureste	-
	Sur	386.3
	Suroeste	-
	Oeste	278.6
	Noroeste	-
Huecos	Norte	128.0
	Noreste	-
	Este	18.9
	Sureste	-
	Sur	120.5
	Suroeste	-
	Oeste	44.4
	Noroeste	162.9
Cubierta	-	1599.4
Suelo	-	2857.4

Tabla 1. Superficies y orientaciones de los cerramientos. *Fuente: Elaboración propia.*

Es destacable la mayor superficie de ventanas en la orientación Norte, lo cual indica que será primordial elaborar una propuesta de mejora de los huecos ya que a priori se puede preveer que supondrá una importante reducción de la demanda.

Por otro lado, al ser un centro de dos plantas con cubierta horizontal, la cubierta supone aproximadamente la mitad de la superficie de suelo del edificio.

2.1.2 Descripción constructiva

Las calidades constructivas seleccionadas resultan de una estimación debido a la falta de datos. Ésta se ha realizado tomando como referencia el año de construcción del edificio y siguiendo el Real Decreto 314/2006 Código Técnico de la Edificación (DB-HE).

Se muestran a continuación las composiciones aproximadas de los distintos cerramientos del edificio, a excepción de las medianeras en caso de que existan, debido a que son consideradas como adiabáticas.

FACHADA	
TRANSMITANCIA TÉRMICA	1.7 W/m ² ·K
MATERIALES	ESPESOR
1/2 pie LP métrico o catalán 40 mm<G<60 mm	0.12 m
Cámara de aire ligeramente ventilada vertical 2 cm	0.02 m
Tabique de LH sencillo [40 mm<Espesor<60 mm]	0.05 m
Enlucido de yeso 1000<d<1300	0.02 m

Tabla 2. Composición de fachada. Fuente: *Elaboración propia.*

CUBIERTA	
TRANSMITANCIA TÉRMICA	1.7 W/m ² ·K
MATERIALES	ESPEJOR
Plaqueta o baldosa cerámica	0.02 m
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d>2000	0.02 m
Tabique de LH sencillo Gran Formato [40 mm<E<60 mm]	0.05 m
Cámara de aire ligeramente ventilada horizontal 2 cm	0.02 m
Hormigón armado d>2500	0.05 m
Enlucido de yeso 1000 <d<1300	0.02 m

Tabla 3. Composición de cubierta. *Fuente: Elaboración propia.*

CERRAMIENTO EN CONTACTO CON EL TERRENO	
TRANSMITANCIA TÉRMICA	3.1 W/m ² ·K
MATERIALES	ESPEJOR
Hormigón armado d>2500	0.30 m
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000<d<1250	0.02 m

Tabla 4. Composición de cerramiento en contacto con el terreno. *Fuente: Elaboración propia.*

PARTICIÓN INTERIOR HORIZONTAL	
TRANSMITANCIA TÉRMICA	1.8 W/m ² ·K
MATERIALES	ESPESOR
Enlucido de yeso 1000<d<1300	0.02 m
Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000<d<1250	0.02 m
Arena y grava [1700<d<2200]	0.05 m
FU Entrevigado cerámico	0.25 m
Enlucido de yeso 1000 <d<1300	0.02 m

Tabla 5. Composición de partición interior horizontal. *Fuente: Elaboración propia.*

PARTICIÓN INTERIOR VERTICAL	
TRANSMITANCIA TÉRMICA	1.9 W/m ² ·K
MATERIALES	ESPESOR
Plaqueta o baldosa cerámica	0.02 m
Tabicón de LH doble Gran Formato 60 mm<E<90 mm	0.06 m
Enlucido de yeso 1000 <d<1300	0.02 m

Tabla 6. Composición de partición interior vertical. *Fuente: Elaboración propia.*

HUECOS	
TRANSMITANCIA TÉRMICA	5.7 W/m ² ·K
FACTOR SOLAR	0.85
MATERIALES	TIPO
Vidrio	Doble en posición vertical
Marco	Metálico en posición vertical

Tabla 7. Composición de hueco. *Fuente: Elaboración propia.*

2.1.3 Descripción operacional

El edificio objeto está habilitado para el uso expreso como centro educativo, por lo tanto el régimen de funcionamiento es el característico del uso del mismo:

RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO	
Horas de apertura día laborable	8 horas
Horario día no laborable	Cerrado
Nº de días laborables al año	188
Nº de días no laborables al año	177
Ocupación media	650 personas

Tabla 8. Régimen de funcionamiento del edificio. *Fuente: Elaboración propia.*

Los datos referentes a los horarios y los días laborables y no laborables, han sido calculados evaluando las características propias generales y calendarios de los centros educativos. Para calcular la ocupación media se ha estimado un número medio de alumnos por cada aula que tiene el centro. Se obtiene así un total de 650 personas entre alumnos, profesorado y personal típico del centro.

2.1.4 Zona climática

El clima de Sevilla es un clima mediterráneo caracterizado por precipitaciones variables, veranos secos y muy calurosos e inviernos suaves y a menudo muy lluviosos que concentran más de la mitad de la lluvia anual. La temperatura media anual es de 19.2 °C, siendo una de las más altas del territorio europeo. La temperatura media máxima en el mes más cálido (Julio) es de 36 °C y la mínima en el mes más frío (Enero) se sitúa en 5.7 °C.

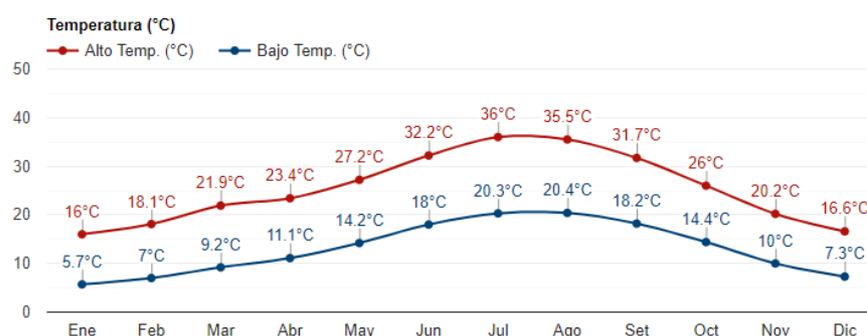


Figura 3. Temperatura media en Sevilla. *Fuente: Weather Atlas. [3]*

El mes de mayor precipitación (y por lo tanto el más húmedo) tiende a ser el mes de Diciembre. El mes de menor precipitación (y por lo tanto el más seco) tiende a ser el mes de Julio.

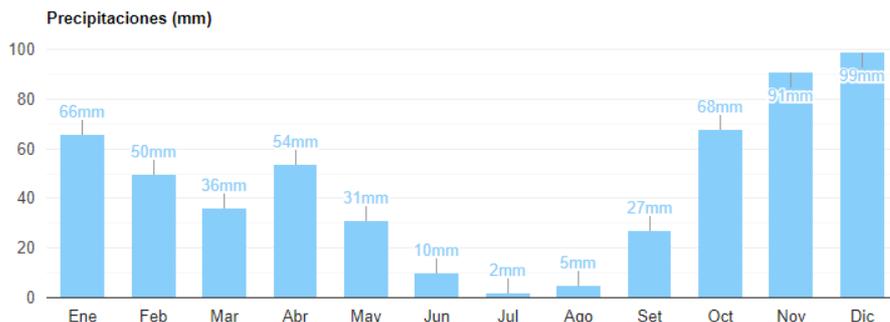


Figura 4. Precipitación media en Sevilla. Fuente: *Weather Atlas*. [3]

De acuerdo con la ubicación del edificio objeto, éste se encuentra en la zona climática B4 según el DB-HE del Código Técnico de la Edificación [4].



Figura 5. Mapa de zonas climáticas. Fuente: *Temario de la asignatura ADE*.

Es importante saber la zona climática ya que de ésta dependerán las demandas de calefacción, refrigeración y ACS de cualquier edificio.

2.2 Demanda de calefacción

La demanda de calefacción va a ser uno de los parámetros de reducción decisivos. Por ello, se va a proceder al análisis del mismo mediante el estudio de la capacidad de reducción de la demanda de calefacción del edificio.

Dado que las demandas de calefacción y refrigeración se calculan paralelamente, se explica a continuación la metodología de cálculo de ambas demandas. En una primera instancia, se procede a la definición del edificio en el programa HULC a partir de la información geométrica, constructiva y operacional del edificio, obteniendo así la demanda de calefacción y refrigeración a partir de simulaciones dinámicas horarias.

Posteriormente, se llevará a cabo el cálculo de las demandas energéticas de calefacción y refrigeración mediante un proceso simplificado siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$Q_{cal} = \left(\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) - \left(\sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} + \phi_a \cdot t \right) \cdot \eta$$

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} + \phi_a \cdot t + \left(\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) - P_{Nocturnas} \cdot \eta \cdot \varepsilon$$

$$P_{Nocturnas} = \rho_a \cdot C_{pa} \cdot (ACH_{noct} - ACH_{eq}) \cdot V \cdot GN$$

Donde los términos que aparecen hacen referencia a:

- $\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i$: Pérdidas de calor a través de los cerramientos
- $\rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V$: Pérdidas de ventilación (infiltración/exfiltración)
- $\sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i}$: Ganancias solares
- $\phi_a \cdot t$: Ganancias debidas a fuentes internas
- η : Factor de utilización
- ε : Eficiencia

En el cálculo de la demanda de calefacción, el primer término hace referencia a las pérdidas de calor del edificio por cada una de las vías posibles (como se ha visto en la definición de los términos). Este término aparece positivo en calefacción, ya que es el responsable de que dicha demanda aumente, y negativo en refrigeración, ya que será el que propiciará que dicha demanda disminuya.

Del mismo modo, el segundo término que aparece en el cálculo de la demanda de calefacción corresponde a las ganancias solares y debidas a fuentes internas, el cual aparece negativo en calefacción por ser el que causará una disminución de la demanda de calefacción. En refrigeración, dicho término es el que aparece inicialmente con valor positivo por ser el que aumenta la demanda de refrigeración.

Así, se puede concluir fácilmente que en régimen de calefacción interesará disminuir las pérdidas de calor, ya que es el término responsable de que aumenten, y en refrigeración se propondrán propuestas para la disminución de las ganancias solares e internas, ya que es el término responsable de que dicha demanda aumente.

Analizando el edificio, se muestran las pérdidas en régimen de calefacción y las ganancias en régimen de refrigeración:



Figura 6. Pérdidas en régimen de calefacción. Fuente: *Elaboración propia*.

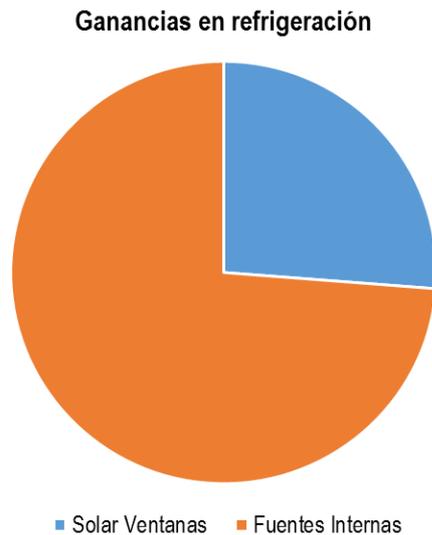


Figura 7. Ganancias en régimen de refrigeración. Fuente: *Elaboración propia*.

En las Figuras mostradas, se puede observar que la transmisión a través de paredes exteriores, cubierta y ventanas constituyen alrededor de un 75% de las pérdidas en calefacción. Con estos datos, se demuestra la necesidad de llevar a cabo la mejora de los elementos constructivos del centro.

Asimismo, en refrigeración también se puede observar que las ganancias debidas a fuentes internas constituyen alrededor del 75% de las totales. Con lo cual, si el objetivo principal fuese disminuir la demanda de refrigeración, sería conveniente estudiar y promover medidas que conlleven la disminución de las mismas.

Para ajustar el procedimiento simplificado, se procede a la obtención de unos coeficientes correctores: un coeficiente corrector de pérdidas, a , y un coeficiente corrector del área solar sur equivalente, b . Con el fin de obtener el valor de los mismos, se usa un procedimiento iterativo de solución de problemas de programación lineal. Así se obtiene:

COEFICIENTES CORRECTORES	
a_{inv}	0.35
b_{inv}	0.21
a_{ver}	0.30
b_{ver}	0.09

Tabla 9. Coeficientes correctores. Fuente: Elaboración propia..

Con ello, las ecuaciones del modelo simplificado resultan:

$$Q_{cal} = \left(\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) \cdot a_{inv} - \left(\sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} \cdot b_{inv} + \phi_a \cdot t \right) \cdot \eta$$

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^{no} I_i \cdot \sum_{j=1}^{ne_i} A_{s,j,i} \cdot b_{ver} + \phi_a \cdot t + \left(\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \rho_a \cdot C_{pa} \cdot ACH_{eq} \cdot V \right) \cdot a_{ver} - P_{Nocturnas} \cdot \eta \cdot \varepsilon$$

La importancia de hallar las demandas de calefacción y refrigeración a partir de HULC y del procedimiento simplificado reside en la reducción de la demanda que se llevará a cabo, la cual se citará más adelante.

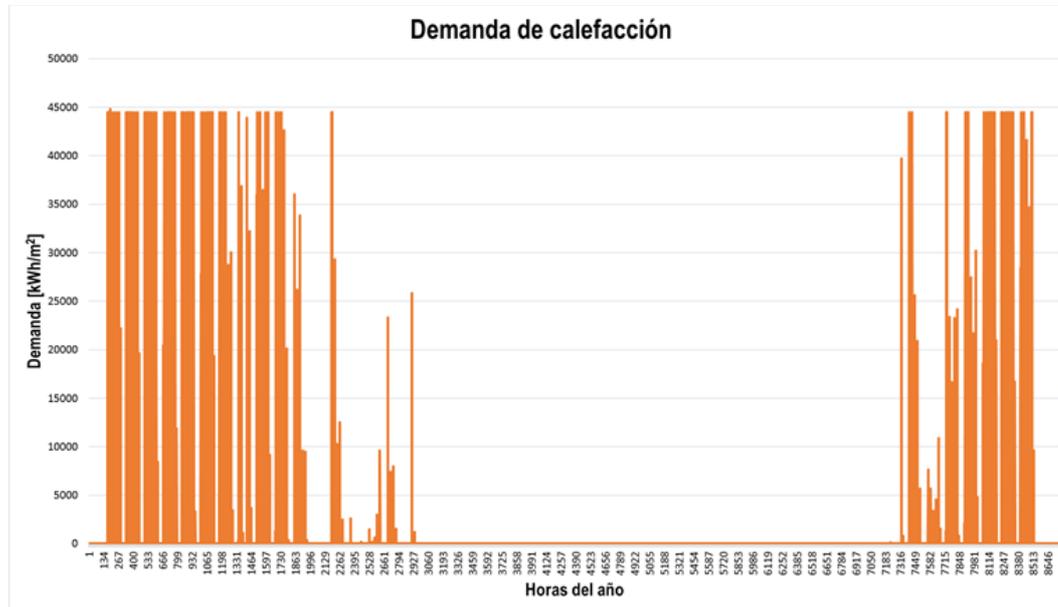


Figura 8. Demanda de calefacción horaria. Fuente: Elaboración propia.

La demanda de calefacción resultante a partir de simulaciones dinámicas horarias se muestra a continuación:

Cabe destacar que se ha tomado la decisión de provocar el encendido de los equipos una hora antes de la apertura del mismo para así reducir la sobrecarga y el sobredimensionamiento de los equipos que se encargan de suplir la demanda de calefacción.

Hallada la demanda de calefacción mediante los dos procedimientos citados anteriormente y comparando los resultados obtenidos, se obtiene:

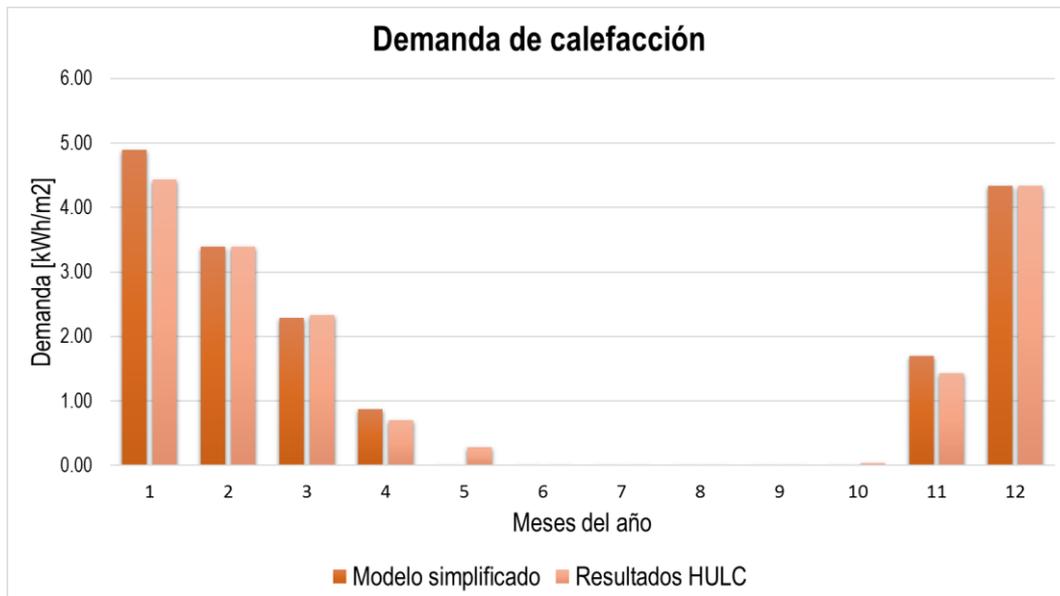


Figura 9. Demanda de calefacción. Fuente: *Elaboración propia*.

Como se puede observar, el procedimiento simplificado se asemeja en gran medida a los resultados obtenidos en HULC. Anualmente, mediante el modelo simplificado se obtiene una demanda de calefacción de 17.49 kWh/m² y la obtenida en HULC resulta de 16.94 kWh/m². De esta manera, comparando ambos valores y observando la *Figura 9*, el modelo simplificado puede asumirse como válido, ya que la diferencia en la demanda anual del modelo simplificado resulta de un 3.14% respecto a la obtenida en HULC.

2.3 Demanda de refrigeración

La demanda de refrigeración ha sido obtenida de la misma forma que la demanda de calefacción: en primer lugar a partir del programa HULC y posteriormente mediante el procedimiento simplificado citado anteriormente.

La demanda de refrigeración, a diferencia de la demanda de calefacción, no será un parámetro decisivo a la hora de llevar a cabo la reducción de demanda del edificio. Esto se justifica a partir del propio uso del edificio, al ser un edificio docente, se asume que permanecerá cerrado en período estival. Con lo cual, al no recibir un uso continuado en dicho período, tendría menos sentido evaluar la capacidad de mejora.

Comparando los resultados obtenidos en ambos métodos, se obtiene:

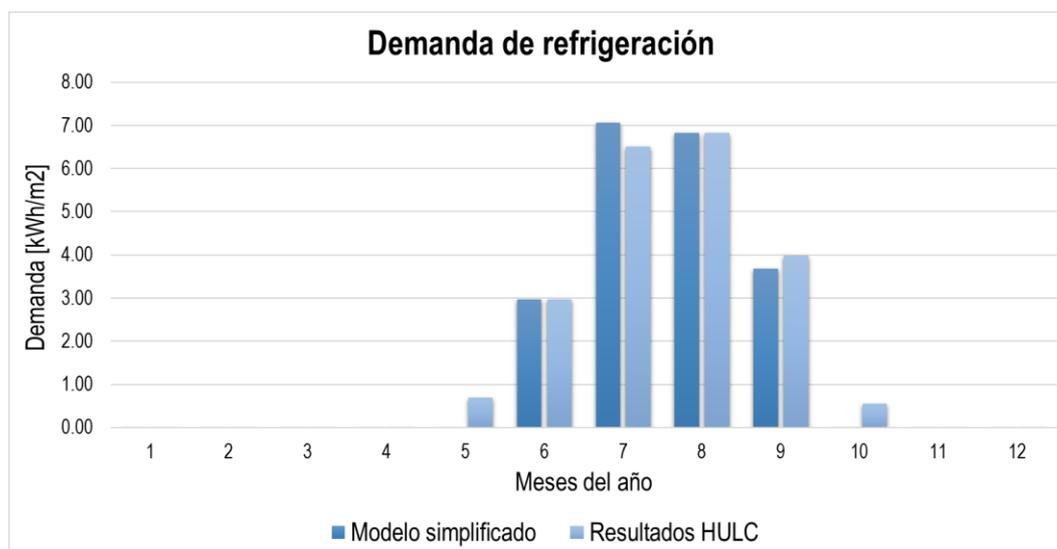


Figura 10. Demanda de refrigeración. Fuente: *Elaboración propia.*

Como se puede observar, el procedimiento simplificado se asemeja en gran medida a los resultados obtenidos en HULC. Anualmente, mediante el modelo simplificado se obtiene una demanda de refrigeración de 21.53 kWh/m² y la obtenida en HULC resulta de 20.54 kWh/m². De esta manera, comparando ambos valores y observando la *Figura 10*, el modelo simplificado puede asumirse como válido, ya que la diferencia en la demanda anual del modelo simplificado resulta de un 4.6% respecto a la obtenida en HULC.

2.4 Demanda de iluminación

La demanda de iluminación ha sido obtenida a partir de una auditoría realizada en el centro durante el año 2018. Para ello, se analiza la distribución de luminarias por tecnología y se estima la potencia instalada en el centro. La distribución de luminarias y de potencia instalada en el centro resulta:

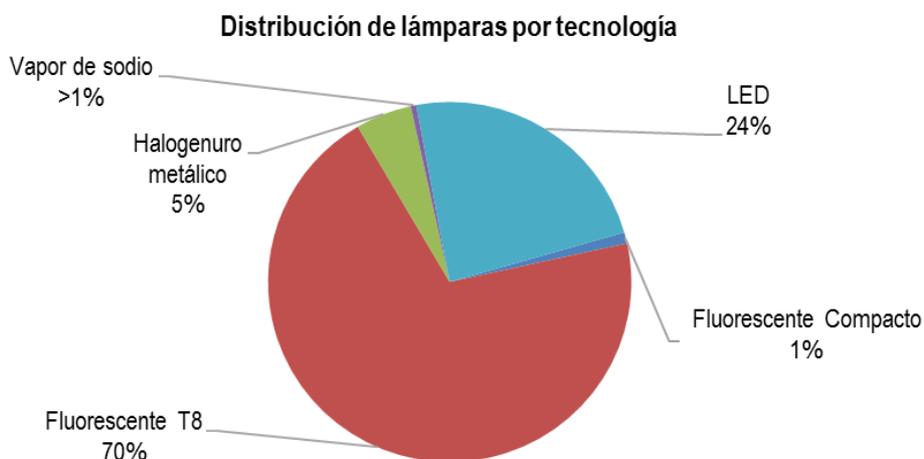


Figura 11. Distribución de luminarias por tecnología. Fuente: *Auditoría del centro.* [2]

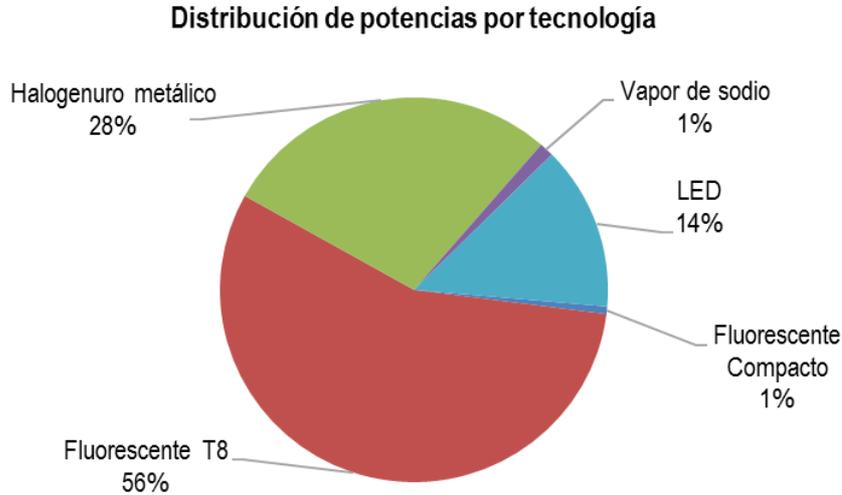


Figura 12. Distribución de potencias por tecnología. Fuente: Auditoría del centro. [2]

A partir de la potencia instalada en el centro y de las horas de funcionamiento estimadas a partir del tipo de uso del mismo, se obtiene una demanda de 5.11 kWh/m².

2.5 Demanda de agua caliente sanitaria (ACS)

La demanda de agua caliente sanitaria se obtendrá del Código Técnico (CTE). Al ser un centro docente con gimnasio y sus correspondientes vestuarios, se supondrá que los estudiantes hacen uso de las duchas diariamente. De esta forma, el Código Técnico dicta que en un gimnasio se tendrá una demanda de ACS de referencia a una temperatura de 60 °C de 21 litros por persona y día [5]. Considerando que en el centro docente se encuentran una cantidad total de 650 alumnos, se calcula una demanda total de 13650 l/día. Para obtenerla en unidades de kWh/m² anuales se aplica:

$$Q_{ACS} \left[\frac{kWh}{m^2} \right] = Q_d^{ACS} \left[\frac{l}{día} \right] \cdot Cp \left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \cdot \rho_{agua} \left[\frac{kg}{l} \right] \cdot (T_{sum} - T_{red}) [^\circ C] \cdot \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ h}} \cdot \frac{hs \text{ docencia}}{\text{año}} \cdot \frac{1}{superficie \text{ centro } [m^2]}$$

Con lo que se obtiene un total de 46.04 kWh/m² anual de demanda de ACS.

En cuanto a la distribución horaria, se obtiene:

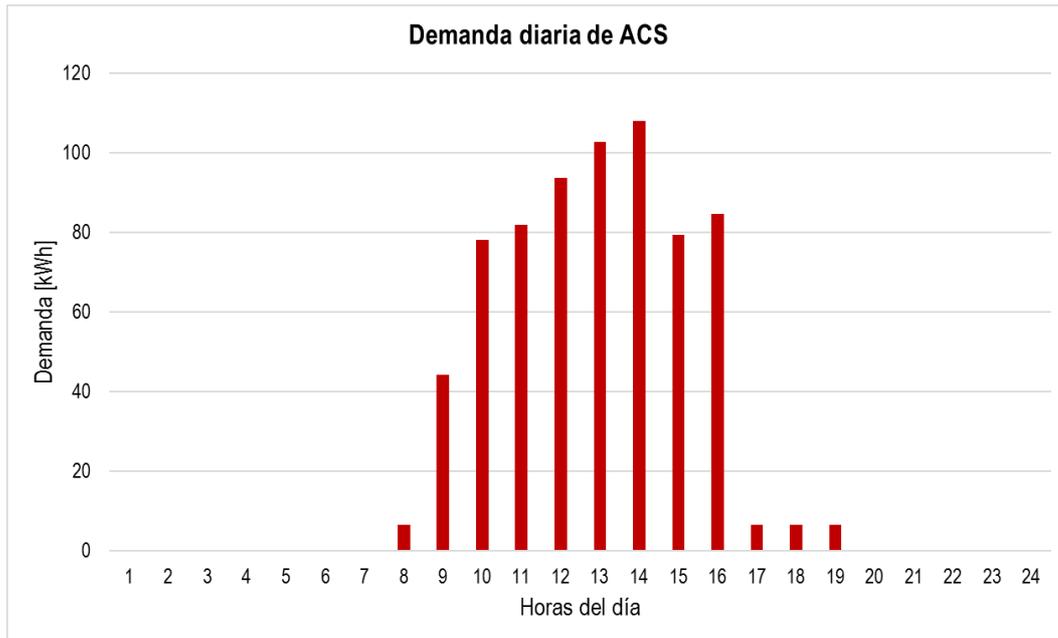


Figura 13. Demanda diaria de ACS. Fuente: *Elaboración propia.*

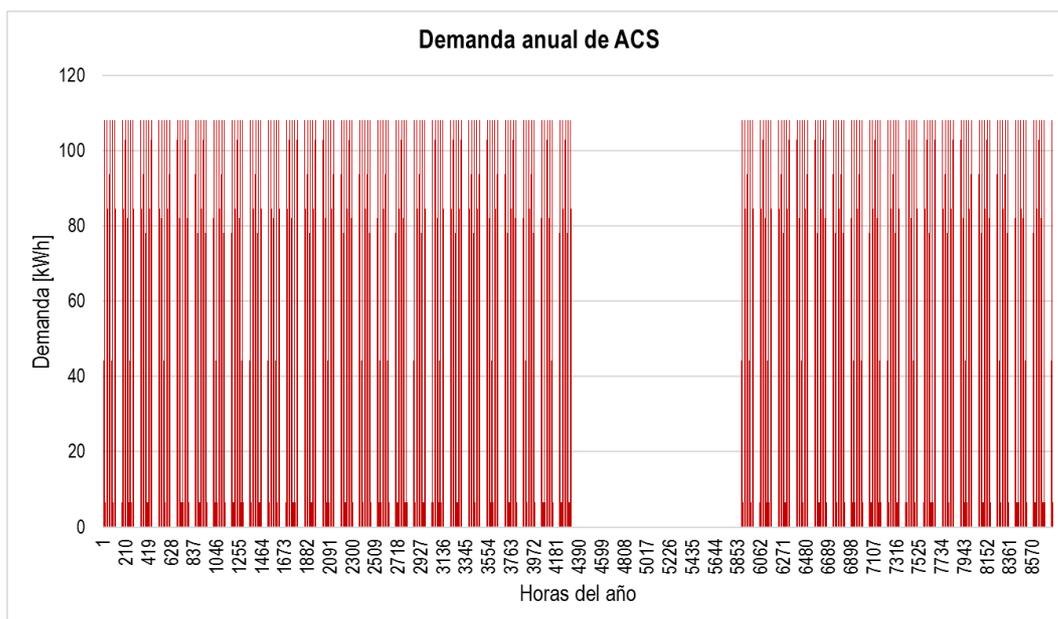


Figura 14. Demanda anual de ACS. Fuente: *Elaboración propia.*

3 REDUCCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

3.1 Situación inicial

Es necesario llevar a cabo una reducción de la demanda del edificio ya que la situación actual del edificio cuenta con unas calidades constructivas con un amplio rango de mejora, puesto que las transmitancias térmicas son elevadas. Asimismo, actualmente no cumplirían los valores mínimos exigidos según la normativa vigente. Las características de la situación inicial del edificio son:

COMPONENTE	VALOR
Transmitancia térmica de muros	1.9 W/m ² · K
Transmitancia térmica de cubierta	1.4 W/m ² · K
Transmitancia térmica de suelos	3.1 W/m ² · K
Transmitancia térmica de ventanas	2.9 W/m ² · K
Transmitancia térmica lineal de puentes térmicos	1204.7 W/m · K
ACH _{eq}	0.3
g _{invierno}	0.69
g _{verano}	0.69
ACH _{eq, nocturna}	0.3

Tabla 10. Parámetros iniciales constructivos del edificio. *Fuente: Elaboración propia.*

Para evaluar el margen de mejora mediante reducción de la demanda, se procede a obtener la clase de eficiencia. A partir del programa HULC, obtenemos la calificación energética del edificio *C.E.I.P. Concepción Estevarena*. Esta calificación energética consiste en una escala basada en unos ratios definidos por el Real Decreto.

El Real Decreto 235/2013, de 5 de Abril, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios, establece el criterio de calificación energética de edificios. Así, para edificios terciarios la calificación energética se obtiene en base a un índice:

Calificación		Índice	
A		C	< 0,40
B	0,40 ≤	C	< 0,65
C	0,65 ≤	C	< 1,00
D	1,00 ≤	C	< 1,30
E	1,30 ≤	C	< 1,60
F	1,60 ≤	C	< 2,00
G	2,00 ≤	C	

Figura 15. Calificación energética según índice. Fuente: Temario de la asignatura ADE.

Dicho índice se obtiene de comparar el edificio en estudio con un edificio de referencia. Dicho edificio es un edificio modelo obtenido a partir del edificio objeto con su misma forma, tamaño, orientación, zonificación interior, uso de cada espacio, iguales obstáculos remotos y con unas soluciones constructivas tipificadas. Este edificio de referencia será similar al edificio objeto, pero se caracterizará por cumplir la reglamentación. En función de si las condiciones del edificio real son mejores o peores energéticamente hablando respecto al edificio de referencia, se obtendrá una letra u otra, siendo A la mejor y G la peor. La demanda de calefacción del edificio de referencia es de 5.68 kWh/m² y la demanda de refrigeración del edificio de referencia es de 40.37 kWh/m². Los resultados obtenidos en la situación inicial son: la calificación actual del edificio es G en lo relacionado a la demanda de calefacción y B en cuanto a la demanda de refrigeración.

3.2 Definición de las propuestas de mejora

Para llevar a cabo la reducción de la demanda, es necesario estudiar las diferentes alternativas posibles a aplicar en la envuelta del edificio. Las propuestas iniciales son:

- ✓ Mejora del aislamiento de los cerramientos.
- ✓ Mejora de la calidad de las ventanas.
- ✓ Tratamiento de puentes térmicos.
- ✓ Control de la estanqueidad.
- ✓ Estrategias de ventilación.

Para cada una de las mejoras, se proponen una serie de valores y, posteriormente, se generan todas las combinaciones posibles de forma que se combinen cada una de ellas con las demás. Posteriormente, mediante el procedimiento simplificado anteriormente citado, se llevarán a cabo los cálculos de demanda del edificio para así poder compararlos entre sí y seleccionar el caso óptimo.

3.2.1 Mejora del aislamiento de los cerramientos

Las diferentes opciones de mejora planteadas en los elementos opacos se obtienen añadiendo aislante al

cerramiento del edificio inicial, como se observa en la *Figura 16*.

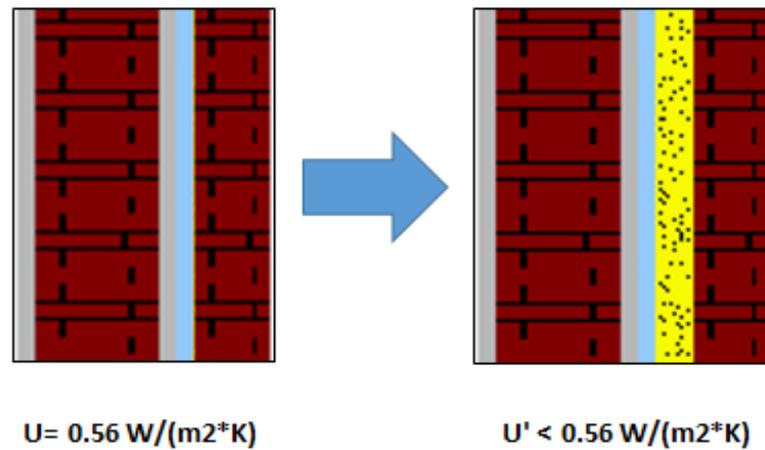


Figura 16. Ejemplo del efecto de aislamiento en opacos. *Fuente: Temario de la asignatura ADE.*

Los valores fijados como objetivo se corresponden con valores recomendados a partir de la zona climática en la que se encuentra el edificio (B4) así como los mejores existentes del mercado actual. De esta forma resulta:

CASO	Transmitancia térmica de muros [W/m ² ·K]
Situación inicial	1.91
Valor mínimo	1
Valor recomendado	0.38
Valor alta eficiencia	0.27

Tabla 11. Mejora de aislamiento en muros. *Fuente: Elaboración propia.*

CASO	Transmitancia térmica de cubierta [W/m ² ·K]
Situación inicial	1.43
Valor mínimo	0.65
Valor recomendado	0.33
Valor alta eficiencia	0.21

Tabla 12. Mejora de aislamiento en cubierta. *Fuente: Elaboración propia.*

CASO	Transmitancia térmica de suelos [W/m²·K]
Situación inicial	3.06
Valor mínimo	0.65
Valor recomendado	0.46
Valor alta eficiencia	0.32

Tabla 13. Mejora de aislamiento en suelos. *Fuente: Elaboración propia.*

3.2.2 Mejora de la calidad de las ventanas

Las diferentes opciones de mejora planteadas en las ventanas del edificio consisten en la sustitución de las mismas por otros acristalamientos y marcos de mayor calidad. Los valores de transmitancia se obtienen de seleccionar la tecnología disponible actualmente en el mercado, de esta manera resulta:

CASO	Transmitancia térmica de ventanas [W/m²·K]
Situación inicial	2.92
Valor mínimo	2
Valor recomendado	1.67
Valor alta eficiencia	1.3

Tabla 14. Mejora de calidad de ventanas. *Fuente: Elaboración propia.*

3.2.3 Tratamiento de puentes térmicos

En cuanto al tratamiento de puentes térmicos, hay dos niveles de mejora. La reducción se concentra en mejorar la transmitancia térmica lineal de los contornos de huecos principalmente, ya que los mismos representan aproximadamente un 50% de los totales. Además, es necesario instalar elementos sellantes que mejoren la estanqueidad del edificio. Los escenarios de mejora propuestos resultan:

Tipo de Puente Térmico	Situación inicial [W/mK]	Escenario Mejora 1 [W/mK]	Escenario Mejora 2 [W/mK]
Frente de forjado	0.7	0.2	0.2
Forjado de cubierta	0.96	0.2	0.2
Forjado de suelo al exterior	0.86	0.2	0.2
Esquina saliente	0.11	0.1	0.1
Esquina entrante	-0.16	-0.15	-0.15
Contorno de hueco (ventanas)	0.61	0.1	0.05
Pilar	1.2	0.2	0.2
Unión entre solera y pared exterior	0.49	0.15	0.15

Tabla 15. Tratamiento de puentes térmicos. *Fuente: Elaboración propia.*

3.2.4 Control de la estanqueidad

El parámetro que define la estanqueidad de un edificio es la tasa de ventilación en renovaciones hora (cantidad de aire que entra en el edificio debido a ventilación o infiltración) a la que se ve expuesto. Al someter un edificio a control de estanqueidad, se tiene el propósito de detectar y sellar posibles infiltraciones de aire no controladas que produzcan pérdidas energéticas por infiltración de aire.

Al llevar a cabo los cálculos mediante el procedimiento simplificado, la permeabilidad global del edificio adquiere un valor por defecto según su tipología y ésta no puede ser modificada al definir la del edificio. Por ello, se llevará a cabo el uso de un caudal de ventilación equivalente que simule el efecto de la mejora en la permeabilidad global del edificio. La propuesta de mejora resulta:

CASO	ACH_eq
Situación inicial	0.30
Escenario Mejora 1	0.25

Tabla 16. Control de la estanqueidad. *Fuente: Elaboración propia.*

3.2.5 Estrategias de ventilación nocturna

La estrategia de ventilación que se va a contemplar como propuesta de mejora reside en la ventilación nocturna. Esta estrategia adquiere relevancia en los meses de demanda de refrigeración, la cual consiste en ventilar el edificio cuando la temperatura exterior es baja y en período de desocupación, es decir, de noche.

Así, la estructura del edificio se enfría durante la noche, creándose en el propio seno del edificio un sumidero de calor que estará disponible para disipar el calor generado durante el periodo de ocupación. Este sumidero, absorberá las ganancias de calor debidas a ocupación y equipos, manteniendo unas condiciones interiores aceptables. Ésta técnica reduce el pico de demanda del edificio en su arranque diario o tras un período de desocupación en los periodos de refrigeración. De esta forma, las propuestas de mejora resultan:

CASO	ACH_eq_noc
Situación inicial	0.3
Escenario Mejora 1	4
Escenario Mejora 2	8
Escenario Mejora 3	12

Tabla 17. Estrategias de ventilación nocturna propuestas. *Fuente: Elaboración propia.*

3.3 Cálculo del Coste de Ciclo de Vida (CCV)

El Coste de Ciclo de Vida de un edificio es una herramienta comunmente usada para la evaluación y comparación de las diferentes alternativas de optimización o estudios de viabilidad económica. Consiste en cuantificar la totalidad de los costes asumidos a lo largo de su vida útil como son adquisición, construcción, operación, mantenimiento... La vida útil se considera de 30 años, siguiendo la siguiente expresión:

$$CCV = \text{Sobrecoste} + COM \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1 + 0.03)^k}$$

En el término de costes de operación se encuentran incluidos los costes asociados a los consumos energéticos de los sistemas de climatización durante toda la vida del edificio. Para obtener un resultado fiable, se ha tenido en cuenta el precio de la energía, la inflación y la tasa de interés.

4 SITUACIÓN DE MÍNIMA DEMANDA ENERGÉTICA

4.1 Elección del caso óptimo

La elección del caso óptimo se hace en función del Coste de Ciclo de Vida (CCV) y del consumo de energía primaria que resulten de la aplicación de las modificaciones anteriormente descritas.

El consumo de energía primaria de cada una de las opciones de mejora depende de la reducción de demanda asociada a cada una de las combinaciones. Cabe destacar que dicha reducción de la demanda tendrá lugar en términos de calefacción y refrigeración, las demandas asociadas a iluminación y agua caliente sanitaria se mantienen invariables. La expresión que caracteriza el consumo de energía primaria se define:

$$C_{EP} = C_{EP}^{CAL} + C_{EP}^{REF} + C_{EP}^{ILU} + C_{EP}^{ACS}$$
$$C_{EP} = \frac{D_{CAL}}{\eta_{CALD}} \cdot FDP_{GN} + \frac{D_{REF}}{\eta_{REF}} \cdot FDP_{ELEC} + \frac{D_{ILU}}{\eta_{ILU}} \cdot FDP_{ELEC} + \frac{D_{ACS}}{\eta_{CALD}} \cdot FDP_{GN}$$

Para el cálculo se han estimado los siguientes valores:

- ✓ Rendimiento de la caldera de 0.92.
- ✓ Rendimiento del equipo de refrigeración de 2.
- ✓ Rendimiento de los equipos de iluminación de 1.

De esta forma, la representación de todas las combinaciones resulta:

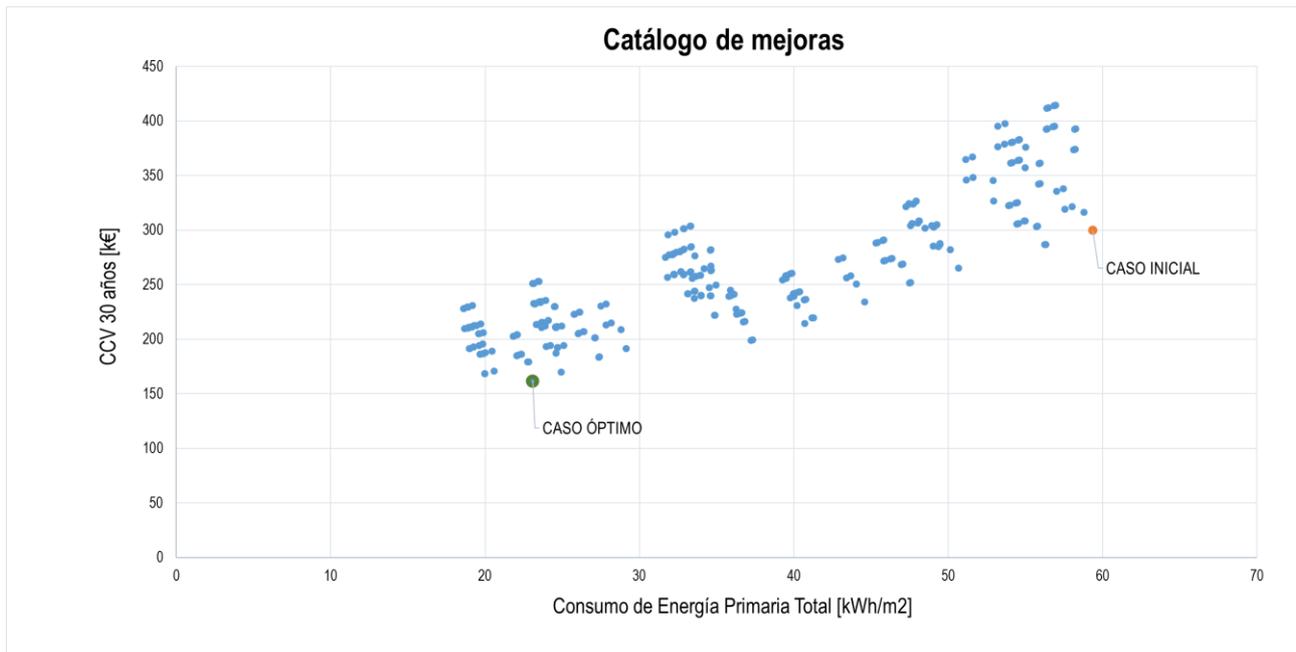


Figura 17. Catálogo de mejoras. Fuente: *Elaboración propia*.

La combinación señalada como caso óptimo ha sido escogida mediante el criterio de menor consumo de energía primaria total y menor CCV a 30 años. El consumo de energía primaria resulta de 23.0 kWh/m² y el CCV es de 161.67 k€. Este caso respecto a la situación inicial supone una disminución del 49.84% del consumo de energía primaria (ya que la situación inicial presentaba un consumo de 46.02 kWh/m²) y del 30.15% en Coste de Ciclo de Vida (ya que la situación inicial presentaba un CCV de 231.47 k€).

4.2 Características de la situación óptima

La situación elegida como óptima presenta una serie de características que resultan de la combinación de las propuestas de mejora citadas con anterioridad. Se define como:

Características	Situación inicial	Situación óptima
Transmitancia térmica de muros	1.91 W/m ² ·K	1.00 W/m ² ·K
Transmitancia térmica de cubierta	1.43 W/m ² ·K	0.65 W/m ² ·K
Transmitancia térmica de suelos	3.06 W/m ² ·K	1.50 W/m ² ·K
Transmitancia térmica de ventanas	2.92 W/m ² ·K	2.00 W/m ² ·K
Transmitancia térmica lineal de puentes térmicos	1204.69 W/m·K	256.65 W/m·K
ACH_eq	0.30	0.30
Factor solar de invierno	0.69	0.69
Factor solar de verano	0.69	0.69
ACH_eq_noc	0.30	12.00

Tabla 18. Características de la situación óptima. *Fuente: Elaboración propia.*

En el caso inicial, en la certificación del edificio se parte de una letra G en calefacción y B en refrigeración, con valores de demanda de 17.50 kWh/m² y 20.54 kWh/m² respectivamente. Para las características referentes a la situación óptima de reducción de demanda del edificio, se obtiene una demanda de calefacción de 2.71 kWh/m² y una demanda de refrigeración de 5.18 kWh/m² al realizar los cálculos mediante el procedimiento simplificado. Esto supone una reducción de la demanda de calefacción de un 84.51%, obteniéndose una letra B en la certificación del edificio respecto a demanda de calefacción y una reducción de la demanda de refrigeración de un 74.78%, obteniéndose una letra A en la certificación del edificio respecto a demanda de refrigeración.

Características	Situación inicial	Situación óptima
Demanda de calefacción	17.50 kWh/m ²	2.71 kWh/m ²
Certificación en demanda	G	B
Demanda de refrigeración	20.54 kWh/m ²	5.18 kWh/m ²
Certificación en refrigeración	B	A

Tabla 19. Comparación entre demanda óptima y demanda inicial. *Fuente: Elaboración propia.*

4.3 Implementación del caso óptimo en HULC

Una vez seleccionada la combinación óptima y obtenidos los valores de reducción de demanda mediante el procedimiento simplificado, se procede a introducir las características de la combinación óptima en HULC para la obtención de los valores de demanda de calefacción y así validar los resultados obtenidos.

Al simular el edificio se obtiene una demanda de calefacción del valor de 2.85 kWh/m², valor muy similar al obtenido anteriormente. En la *Figura 18*, se observa una comparación de la reducción de demanda usando la herramienta HULC y el procedimiento simplificado.

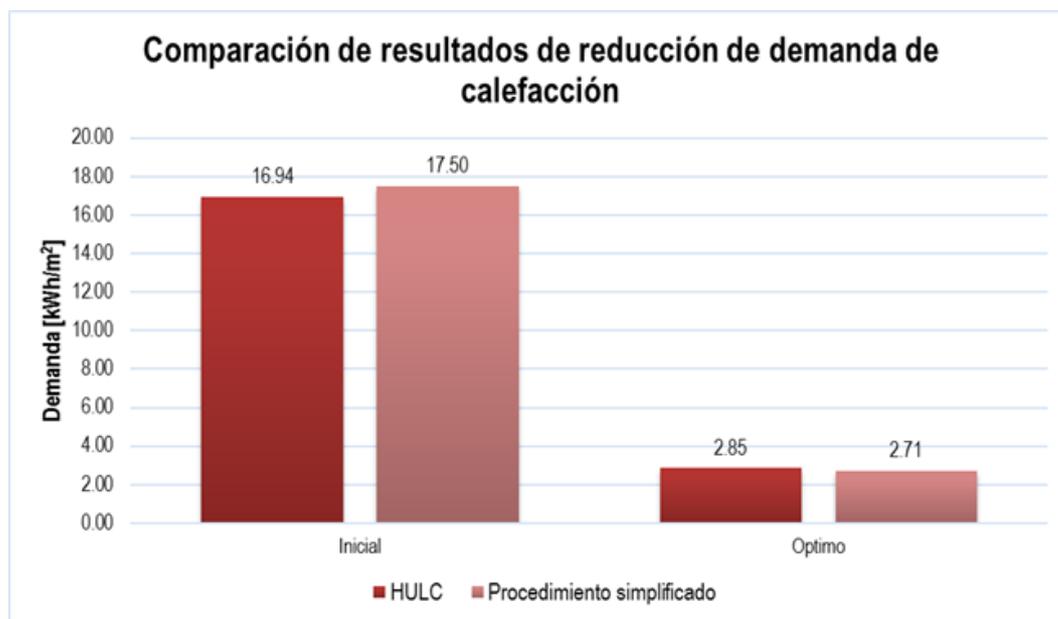


Figura 18. Comparación de los resultados de reducción de la demanda de calefacción. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los resultados que se han obtenido en HULC son muy similares a los del procedimiento simplificado, validando así la obtención de la combinación óptima en cuanto a reducción de demanda.

5 EDIFICIO EN OSCILACIÓN LIBRE

Se dice que un edificio se encuentra en oscilación libre cuando no hay equipo de climatización que supla la demanda, o cuando éstos no estén en funcionamiento. Normalmente, un edificio en oscilación libre está asociado a problemas de confort térmico, definiéndose el confort térmico como una sensación neutra de la persona respecto a un ambiente térmico determinado. Según la norma ISO 7730 el confort térmico “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”.

Las variables para calificar el confort térmico se pueden reducir al estudio de la temperatura del aire siempre y cuando la humedad, la velocidad del aire y el calor radiante no influyan en el clima interior. De esta manera, las condiciones operacionales estándar que definen el confort térmico son temperatura entorno a 20 °C en invierno y a 25 °C en verano.

Por lo general, un edificio en condiciones de oscilación libre en su período de funcionamiento no cumplirá la normativa. Sin embargo, podría haber casos en los que no sea necesario equipo de climatización. Para ello, se tiene que dar que, estando en oscilación libre, no se supere más de un 4% del total las horas de funcionamiento fuera de confort térmico.

En la situación inicial del centro, esta condición no se cumple ya que las calidades constructivas no son lo suficientemente aptas. Sin embargo, al llevar a cabo la reducción de demanda en el centro, es posible alcanzar el cumplimiento de la normativa aún sin haber realizado la optimización de la instalación. Para ello, se simula el edificio en condiciones de oscilación libre y se estudia la temperatura interior. Se obtiene:

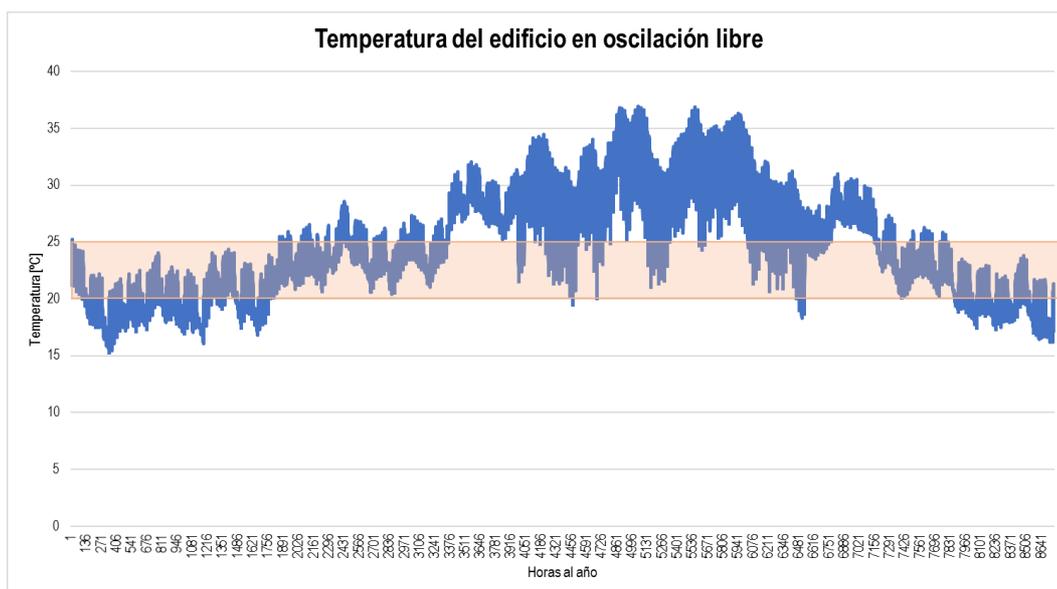


Figura 19. Temperatura del edificio en oscilación libre. Fuente: *Elaboración propia.*

En la *Figura 19* se puede apreciar en azul la evolución de las temperaturas a lo largo del año con ausencia de equipos de climatización. La franja naranja representa las condiciones de confort, fijándolas en una temperatura alrededor de los 20 °C y los 25 °C en las temporadas referentes a climatización (alrededor de 20 °C) y refrigeración (alrededor de 25 °C). Se puede observar que la mayor parte del tiempo las condiciones de confort no se cumplen.

Evaluando las 8760 horas del año, el límite del 4% supondría no superar las 350 horas fuera de confort térmico. Sin embargo, se obtiene que el edificio se encuentra un total de 5728 horas fuera de confort térmico (siendo un 65% de las horas totales al año).

Realizando el mismo estudio referente a las horas de funcionamiento, se obtienen valores diferentes. Se sabe que edificio se encuentra en horario de funcionamiento un total de 1472 horas al año (partiendo de un total de 188 días de apertura al año en horario de 8 horas diarias). El límite del 4% de las horas totales fuera de confort térmico supondría un máximo de 59 horas al año. Sin embargo, se obtiene un total de 561 horas al año fuera de confort térmico. Lo cual supone un 38.11% de las horas totales de funcionamiento anuales.

A pesar de que la totalidad de horas en las que son necesarias equipos de climatización disminuyen al evaluar las horas de funcionamiento, se siguen obteniendo valores lejos de la limitación. Por lo tanto, se concluye en la necesidad de instalar equipos de climatización para garantizar la satisfacción térmica de los usuarios y el correcto funcionamiento del centro.

6 INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN Y ACS

La instalación de climatización es aquella que está compuesta por los equipos encargados de mantener las condiciones óptimas de temperatura del aire del interior del centro. Un buen dimensionamiento y elección de los sistemas es fundamental para garantizar las condiciones de confort del edificio además del ahorro y aprovechamiento de la energía producida. Por tratarse de un centro educativo, no se contemplará la simulación de los sistemas de refrigeración ya que aún siendo importantes, las horas de funcionamiento de los mismos son mucho menores que las de los equipos de calefacción y agua caliente sanitaria.

6.1 Instalación inicial

La instalación de calefacción y ACS que posee el centro en la situación de partida está compuesta por una caldera convencional Ferroli de 200 kW encargada de suplir agua caliente hacia los 60 radiadores del edificio para combatir la demanda de calefacción así como agua caliente sanitaria a un tanque de 3.81 m³.

6.1.1 Caldera convencional de agua caliente

Las calderas convencionales son equipos en los que el calor se genera mediante la combustión de gasóleo, gas natural, etc; que calientan un fluido, generalmente agua, y bombea a tanques de agua caliente donde se mantiene hasta que haya demanda en el edificio. En ese momento, se procede a bombear de nuevo, esta vez a través de una red de tuberías hasta los radiadores de la zona a climatizar o hacia los tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria. Suelen tener un rendimiento aproximado del 90%.

Según la Directiva Europea 92/42/CEE que fue transpuesta a la legislación Española mediante el Real Decreto 275/1995 de 24 de Febrero, la caldera convencional es aquella que debe trabajar con temperaturas de retorno superiores al punto de rocío de los humos, ya que no soportan los efectos de las condensaciones en su interior. Debido a este requerimiento, este tipo de calderas tienen menor rendimiento a carga parcial que a carga total.

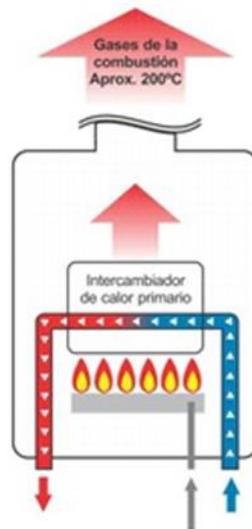


Figura 20. Funcionamiento de caldera convencional. Fuente: Multiservice Group. [6]

La caldera que compone la instalación inicial de climatización del edificio presenta las siguientes características:

Caldera convencional	
Combustible	Gas Natural
Tipo	Convencional
Potencia calorífica	200 kW
Rendimiento	92 %

Tabla 20. Característica de la caldera. Fuente: Auditoría del centro.

6.1.2 Tanque de almacenamiento

Un tanque de almacenamiento es un depósito aislado térmicamente que permite almacenar agua caliente para el posterior suministro cuando la instalación lo requiera. Mantiene la temperatura del agua gracias a un serpentín que obtiene la energía necesaria de la caldera previamente mencionada. Para ello, se hace necesario la implantación de un intercambiador de calor que facilite dicho intercambio de energía. Cabe destacar la importancia del serpentín cuando el suministro es de agua caliente sanitaria, ya que eliminan la aparición de zonas frías en el tanque, donde podría proliferar la bacteria de la legionela.

Su geometría es generalmente cilíndrica y alargada para así favorecer la estratificación de la temperatura: a mayor profundidad, menor temperatura. Esto equivale a una relación directa entre rendimiento y altura.

Con objetivo de facilitar la estratificación del tanque, el agua caliente que llega de los equipos generadores entrará por la parte superior del tanque. Asimismo, el agua caliente a cubrir la demanda, también será expulsada por la parte superior. Sin embargo, el agua que entra de la red a menor temperatura y el agua que sale del tanque hacia los equipos calentadores, se obtendrá de la zona inferior del tanque de almacenamiento.

Entre las principales ventajas cabe destacar el ahorro económico que supone calentar agua a través de la energía producida en la caldera respecto a la alternativa de calentar agua a partir de la resistencia eléctrica de un termo. Además, se garantiza un suministro de agua a temperatura constante al haber una variación mínima de temperatura en el caso de abrir o cerrar otras llaves conectadas al acumulador. Todo ello, con un menor consumo eléctrico que el que supondría calentar la misma cantidad con un termo.

Sin embargo, en cuanto a inconvenientes cabe destacar la necesidad de espacio extra debido al tamaño del tanque de almacenamiento. Además, los períodos de recuperación de calor suelen ser largos.

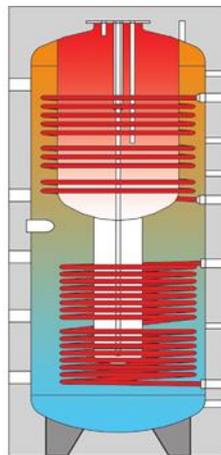


Figura 21. Funcionamiento de tanque de almacenamiento con serpentín. Fuente: Ivar-Group. [7]

6.1.3 Bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas o bombas de agua son máquinas generadoras que transforman la energía mecánica en energía hidráulica. La acción mecánica genera un vacío en la succión, lo que permite que la presión atmosférica fuerce al fluido a desplazarse hacia la entrada de la misma.

En una instalación para calefacción o ACS es necesario implementar bombas hidráulicas para que el fluido pueda desplazarse por todo el circuito. Por lo general, las calderas llevan instalada una bomba en su interior, pero a veces, según la altura, dimensiones o seccionamiento de la instalación, es necesario otra bomba de apoyo.



Figura 22. Bomba hidráulica. *Fuente: Calfri.* [8]

6.1.4 Funcionamiento de la instalación inicial

La instalación inicial cuenta con una caldera convencional encargada de suministrar agua caliente sanitaria a los radiadores (para suplir la demanda de calefacción) y al tanque de agua caliente sanitaria (para suplir la demanda de agua caliente sanitaria). En el lazo de calefacción, el agua se suministra a 67 °C a los radiadores, donde al enfriarse el agua, vuelve a la caldera para repetirse el proceso. En el lazo de agua caliente sanitaria, el agua llega al tanque, encargado de calentar el agua proveniente de la red a partir del agua caliente proveniente de la caldera. Así, una vez alcanzados los 60 °C, el agua llega a las duchas satisfaciéndose la demanda de ACS.

Para la correcta comprensión del funcionamiento de la instalación existente, se muestra a continuación un esquema de la instalación inicial.

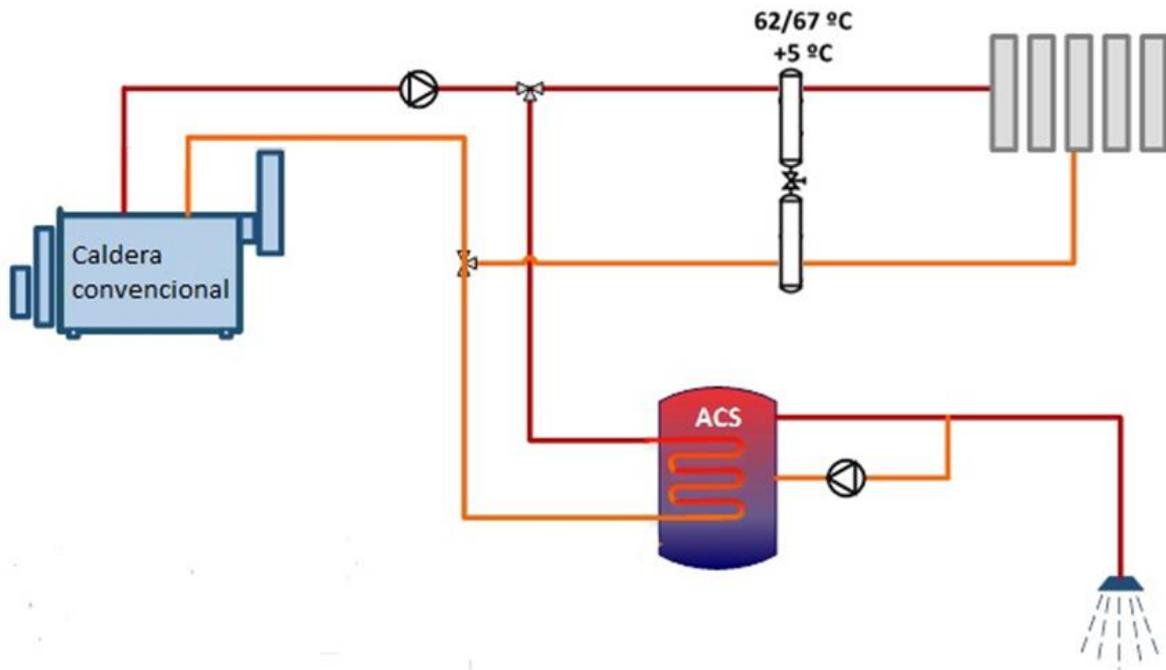


Figura 23. Esquema de funcionamiento de la instalación inicial. *Fuente: Elaboración propia.*

6.2 Instalación propuesta

Una vez llevada a cabo la reducción de la demanda en el edificio, se procede al estudio para la reducción del consumo en los equipos de climatización y ACS. Para ello, se propone la implantación de una nueva instalación más eficiente, acorde a la normativa y lo más próxima posible al objetivo de consumo casi nulo. Cabe destacar que los parámetros de los equipos de la instalación propuesta no serán fijos. Es decir, se mantendrá la disposición de los equipos pero posteriormente se definirá el análisis de las diferentes variables a combinar para encontrar la solución óptima.

La instalación propuesta cuenta con la caldera convencional que se encuentra instalada en el centro para ofrecer apoyo a la bomba de calor a instalar. Por lo tanto, en cuanto a la definición de los diferentes equipos que componen la instalación, se tiene que el único elemento innovador será la bomba de calor, adaptando así el resto de los elementos al correcto funcionamiento de la instalación completa.

El objetivo es cubrir la demanda de ACS con la bomba de calor. De esta manera, la caldera será la encargada de cubrir la demanda de calefacción así como ofrecer apoyo a la bomba de calor cuando ésta lo requiera. Con la reducción de la demanda y la implantación de una instalación más eficiente, el objetivo es conseguir un edificio con un consumo energético considerablemente menor.

6.2.1 Bomba de calor

Una bomba de calor es un equipo cuyo funcionamiento consiste en transportar energía en forma de calor de un ambiente (aire, agua o suelo) a otro. Este proceso se genera a través del cambio de estado de gas a líquido de un fluido refrigerante por medio de la temperatura ambiente y con ayuda de un compresor.

La bomba de calor tiene la capacidad de capturar energía de fuentes externas y gratuitas. Esta característica hace que sea un equipo que multiplica la potencia eléctrica de accionamiento del compresor, transportando calor útil de forma altamente eficiente.

La ventaja de usar la bomba de calor reside en su capacidad de suministrar más energía útil (en forma de calor) de la que utiliza para su funcionamiento (energía eléctrica), pudiendo llegar a producir un ahorro del 70% respecto a un sistema de calentamiento tradicional como gas, electricidad o gasóleo. Para la instalación propuesta, se ha optado por una bomba de calor aire-agua.

6.2.2 Funcionamiento de la instalación propuesta

El esquema de funcionamiento de la instalación propuesta se muestra a continuación:

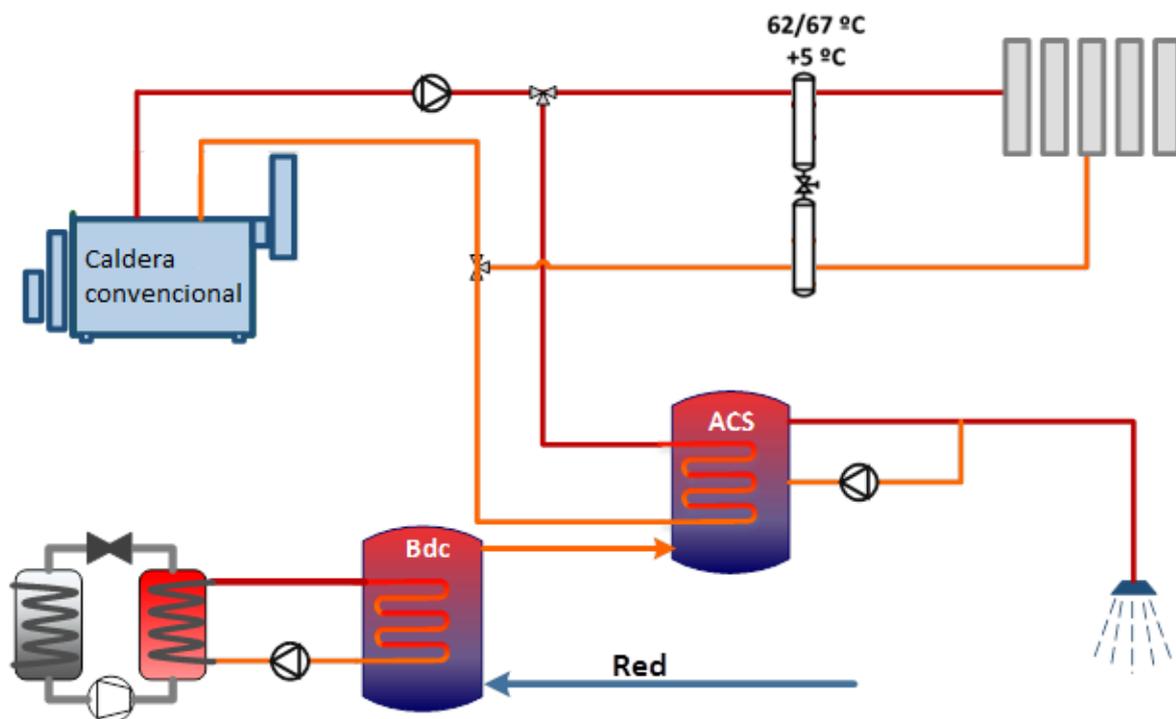


Figura 24. Esquema de funcionamiento de la instalación propuesta. Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 Diagrama de flujo

Para la completa comprensión del esquema anteriormente representado, se realizó un diagrama de flujo para la identificación de una forma visual y rápida. El control de la instalación estará en función de las

temperaturas de los tanques de calefacción, ACS y del propio tanque de la bomba de calor. Dependiendo del valor de las temperaturas, se activará el funcionamiento de las bombas correspondientes al equipo adecuado. En el diagrama de flujo representado aparecen dos lazos principales: el lazo de la caldera y el de la bomba de calor. El lazo de la caldera está a su vez dividido en la parte de calefacción y de ACS. Sin embargo, el funcionamiento de todos ellos es muy similar.

En la parte de calefacción, se mide la temperatura del tanque de calefacción y es enviada al controlador. Si la temperatura es inferior a 62 °C mandará la señal para iniciar el funcionamiento de la caldera, o de no producir el apagado de la misma, en caso de que ya se encontrase funcionando. Si la temperatura es superior a 62 °C pero inferior a 67 °C, el controlador también será el encargado de enviar la señal para garantizar el funcionamiento de la caldera. Sin embargo, si la temperatura es superior a 67 °C, el controlador deberá garantizar que la caldera no se encuentra en funcionamiento.

En la parte de ACS, el funcionamiento es exactamente igual que en la parte de calefacción con la única diferencia de que la temperatura a medir es la del tanque de ACS y no la del tanque de calefacción.

En lo referente al lazo de la bomba de calor, como se ha dicho anteriormente, es también muy similar a las dos partes explicadas. Las principales diferencias es que la temperatura a medir es la referente al tanque de la bomba de calor y que el controlador enviará las señales de “apagado/encendido” a la bomba de calor en lugar de a la caldera.

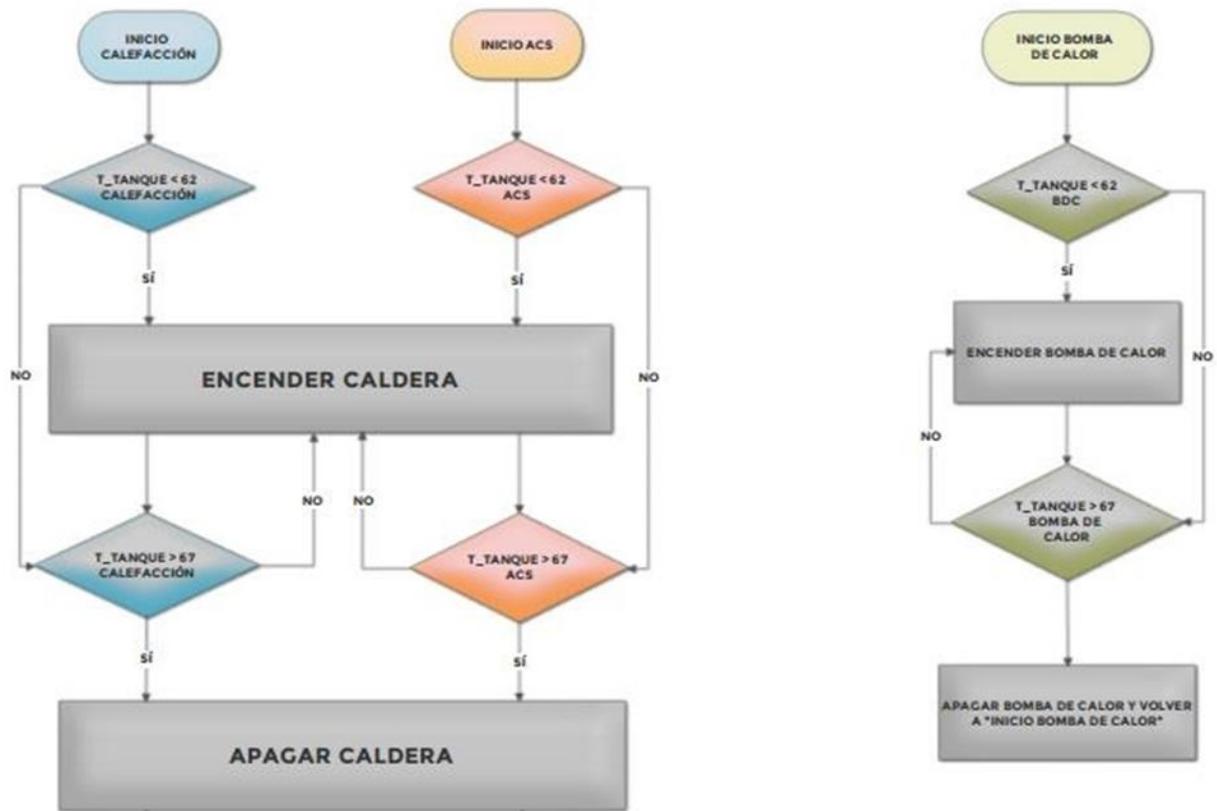


Figura 25. Diagrama de flujo de la instalación propuesta. Fuente: Elaboración propia.

7 MODELADO DE LA INSTALACIÓN

7.1 Introducción

Para la definición de los equipos y corroborar su correcto funcionamiento, así como dimensionar la instalación propuesta, se cuenta con el apoyo del programa TRNSYS. TRNSYS es un software basado en un entorno gráfico muy flexible, usado para simular el comportamiento de sistemas transitorios. Fue desarrollado en la Universidad de Wisconsin, y enriquecido por las contribuciones de TRANSSOLAR Energietechnik GMBH, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) y Thermal Energy Systems Specialists (TESS).

TRNSYS es un software muy adecuado para diseñar, optimizar, y hacer un análisis detallado de cualquier sistema cuyo comportamiento sea dependiente del paso del tiempo. Es usado por ingenieros e investigadores de todo el mundo para validar nuevos desarrollos energéticos, desde sistemas de agua caliente sanitaria hasta el diseño y simulación de edificios y sus equipos, incluyendo estrategias de control y sistemas alternativos de energía (eólica, fotovoltaica, solar, sistemas de hidrógeno, etc.).

La forma de generar un proyecto en TRNSYS resulta muy intuitiva: se conectan gráficamente los componentes del sistema (types) por medio del interfaz visual Simulation Studio. Cada uno de los types se describe con un modelo matemático mediante lenguaje de programación Fortran y lleva asociado un Proforma en el Simulation Studio. Éste describe el componente como una caja negra por medio de entradas, salidas y parámetros. Las salidas de cada componente actúan como entradas de otro.

En el caso del presente proyecto, emplearemos la versión TRNSYS 16, que es la que se nos ha podido proporcionar, con la licencia correspondiente.

La primera versión pública de TRNSYS fue desarrollada en el año 1975 para el estudio de sistemas con energía solar y se ha ido desarrollando a través de distintos centros de investigación de EEUU, Alemania, Francia y otros países.

Uno de sus usos originales fue el de realizar la simulación dinámica del comportamiento de un sistema de agua caliente solar para un año meteorológico típico, a fin de que se pudieran comprobar los ahorros de costes a largo plazo de estos sistemas.

En la actualidad, TRNSYS es una potente herramienta de cálculo que permite la resolución transitoria de cualquier tipo de sistema y, aunque se centra en la evaluación del comportamiento térmico y eléctrico de sistemas, puede simular otros procesos transitorios como el tráfico de vehículos o procesos biológicos.

Después de casi 40 años de disponibilidad comercial, TRNSYS sigue siendo una herramienta capaz de acomodar las diferentes necesidades de los investigadores de la comunidad científica gracias a las posibilidades que ofrece.

7.2 Implementación de la instalación en TRNSYS

Para la implementación de la instalación en TRNSYS el primer paso es seleccionar los types con los que se van a definir los diferentes elementos que componen la instalación. En cada uno de ellos se definen las ecuaciones de comportamiento del equipo, pudiendo seleccionar un type dado por el programa para ello o diseñar un type según las necesidades del proyecto.

Se procede a detallar la selección de types para cada equipo así como las ecuaciones de comportamiento que los definen.

7.2.1 Caldera convencional

Para la definición de la caldera en TRNSYS se hace uso del type calculadora. Se introducen las ecuaciones de comportamiento de la caldera para así modelarla a libre elección. De esta forma, podemos acercarnos más a la realidad que utilizando los types existentes en TRNSYS. Los parámetros que se incorporan en este type son:

- ✓ Factor de carga parcial
- ✓ Rendimiento
- ✓ Potencia nominal
- ✓ Señal de control
- ✓ Temperaturas
- ✓ Caudales

Las características iniciales establecidas en la caldera son una potencia nominal de 200 kW y un rendimiento nominal de la caldera del 92%.

Asimismo, las ecuaciones que definen el comportamiento de la caldera resultan:

$$Q_{cald} = m_{cald} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{cald} = \frac{P_{nom}}{\eta}$$

Para definir el rendimiento de la caldera, se tiene en cuenta la curva de rendimiento para una caldera estándar según el manual de curvas CALENER.

REND-TERM_FCP (HIR-FPLR)	Variación, respecto al valor nominal, de la relación entre el consumo de combustible y la potencia térmica de la caldera (HIR), en función del factor de carga parcial. El valor del HIR es el inverso del rendimiento térmico nominal definido en CALENER-GT, (REND-TERM).	
	$f(PLR)$	
	Cúbica, Cuadrática, Lineal	
	PLR	Factor de carga parcial, definido como cociente entre la carga del sistema y la capacidad sensible del mismo (en el caso de calefacción la carga sensible coincide con la total).

Figura 26. Definición de la curva de rendimiento de la caldera. Fuente: Manual de curvas CALENER.

La expresión de la curva se muestra a continuación, donde los valores de los diferentes coeficientes se obtienen de los valores por defecto del manual de curvas CALENER:

$$\eta = \eta_{nom} \cdot (0.009117 + 0.992645 \cdot fcp - 0.006778 \cdot fcp^2 + 0.004876 \cdot fcp^3)$$

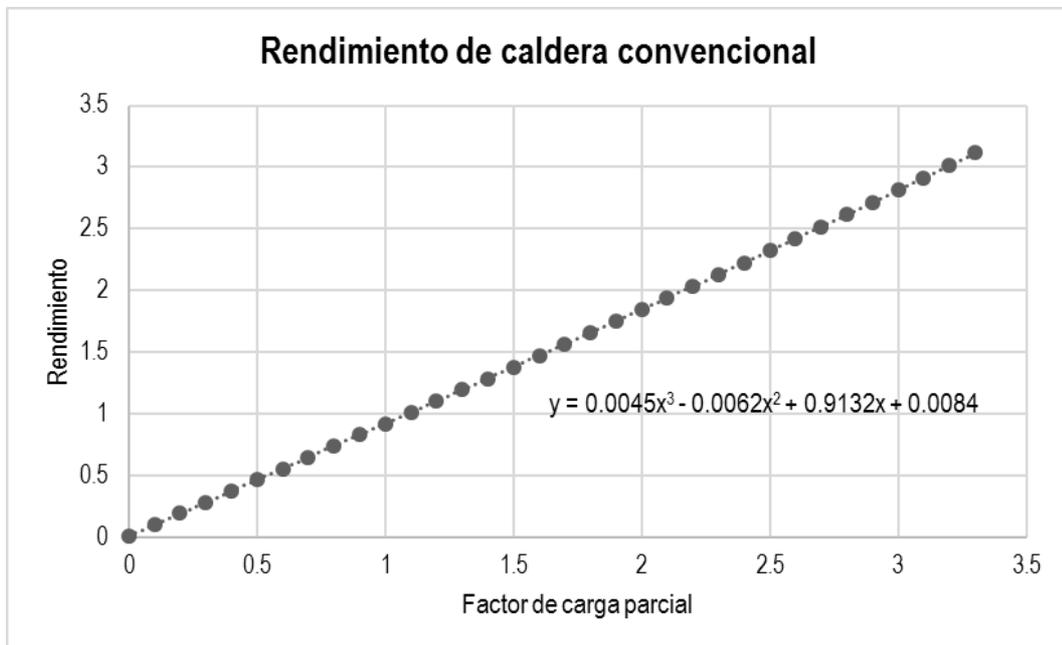


Figura 27. Rendimiento de caldera convencional. Fuente: Elaboración propia.

La definición en TRNSYS en el type, queda como se muestra a continuación:

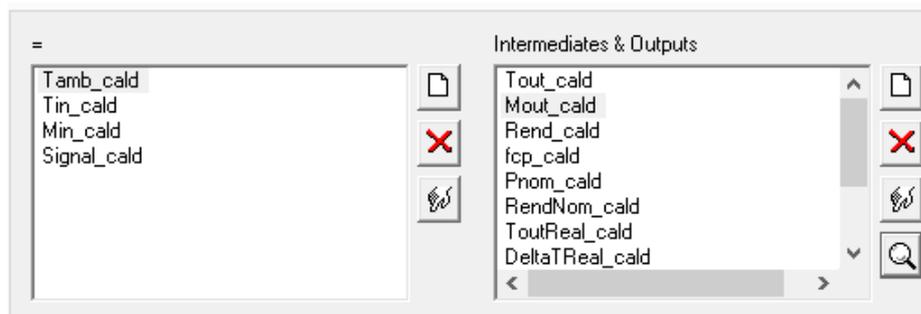


Figura 28. Definición de ecuaciones de la caldera en TRNSYS. Fuente: TRNSYS Simulation Studio.

El objetivo de la definición de ecuaciones para el funcionamiento en TRNSYS es que la caldera mantenga la temperatura de salida hacia los tanques de calefacción y ACS en un rango entre 62 °C y 67 °C. Para ello, se cuenta con un controlador encargado de mandar la señal a la bomba de la caldera para activar o desactivar su funcionamiento.

El caudal que mueve la bomba de la caldera tiene un valor fijo, calculado en función de la demanda punta de calefacción. Así, se opera:

$$m_{cald} = \frac{D_{cal,max}}{\Delta T \cdot C_p}$$

La demanda punta utilizada para el cálculo es la referente a la situación de demanda mejorada descrita en la Sección 4: *Situación de mínima demanda energética*, siendo la demanda máxima de 44473.2 Wh. Con ello y con un salto de temperatura de 5 °C, resulta un caudal de operación de la bomba de 7642.17 kg/h.

7.2.2 Bomba de calor

Para la definición de la bomba de calor en TRNSYS se hace uso del type calculadora. Se introducen las ecuaciones de comportamiento de la bomba de calor para así modelarla a libre elección. De esta forma, podemos acercarnos muchísimo más a la realidad que utilizando los types existentes en TRNSYS. Los parámetros que se incorporan en este type son:

- ✓ Factor de carga parcial
- ✓ Rendimiento
- ✓ Potencia nominal
- ✓ Señal de control
- ✓ Temperaturas
- ✓ Caudales

Las características en la bomba de calor de rendimiento y potencia nominal no están fijadas ya que se procederá a un análisis de optimización para establecer las condiciones óptimas de funcionamiento como se verá en el siguiente apartado.

Las ecuaciones que definen el comportamiento de la bomba de calor resultan:

$$Q_{BDC} = m_{BDC} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{BDC} = \frac{P_{nom}}{\eta}$$

Para definir el rendimiento de la bomba de calor, se tiene en cuenta la curva de rendimiento para una bomba de calor estándar según el manual de curvas CALENER.

REND-TERM_FCP (HIR-FPLR)	Variación, respecto al valor nominal, de la relación entre el consumo de combustible y la potencia térmica de la caldera (HIR), en función del factor de carga parcial. El valor del HIR es el inverso del rendimiento térmico nominal definido en CALENER-GT, (REND-TERM).	
	$f(PLR)$	
	Cúbica, Cuadrática, Lineal	
	PLR	Factor de carga parcial, definido como cociente entre la carga del sistema y la capacidad sensible del mismo (en el caso de calefacción la carga sensible coincide con la total). n/a

Figura 29. Definición de la curva de rendimiento de la bomba de calor. Fuente: Manual de curvas CALENER.

Cabe destacar que en el manual de curvas CALENER se define caldera como equipo generador de agua caliente sanitaria, especificando más adelante los coeficientes para la definición de la curva según el equipo.

La expresión de la curva se muestra a continuación, donde los valores de los diferentes coeficientes se obtienen de los valores por defecto del manual de curvas CALENER:

$$\eta = \eta_{nom} \cdot (0.085652 + 0.938814 \cdot fcp - 0.183436 \cdot fcp^2 + 0.15897 \cdot fcp^3)$$

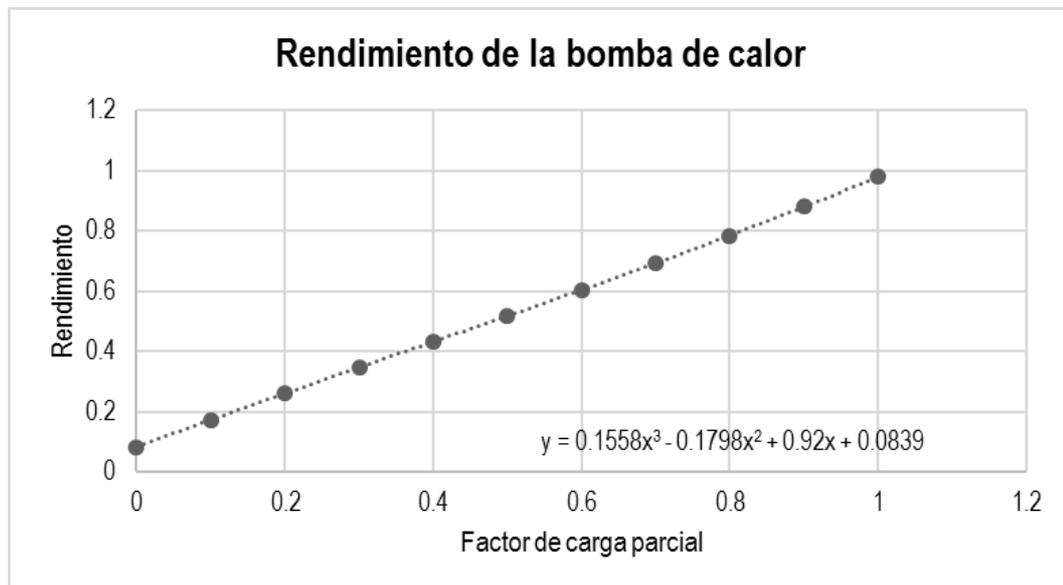


Figura 30. Rendimiento de bomba de calor. Fuente: Elaboración propia.

La definición en TRNSYS en el type, queda como se muestra a continuación:

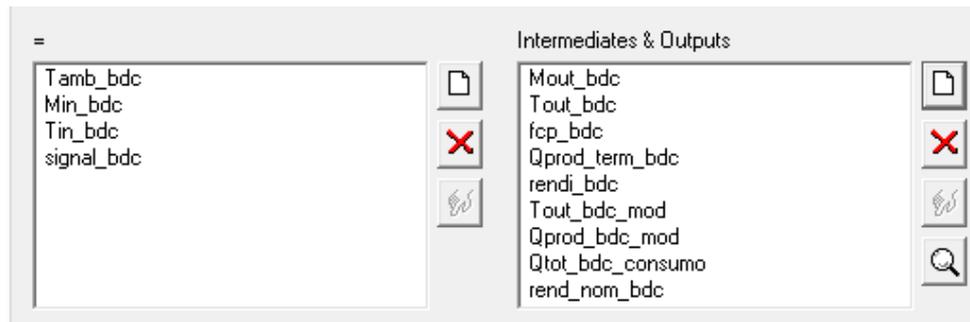


Figura 31. Definición de ecuaciones de la bomba de calor en TRNSYS. *Fuente: TRNSYS Simulation Studio.*

El objetivo de la definición de ecuaciones para el funcionamiento en TRNSYS es que la bomba de calor mantenga la temperatura de salida hacia el tanque de ACS en un rango entre 62 °C y 70 °C. Para ello, se cuenta con un controlador encargado de mandar la señal a la bomba de la bomba de calor para activar o desactivar su funcionamiento.

El caudal que mueve la bomba de la bomba de calor se obtiene en función del volumen del tanque de la bomba de calor para que no se produzcan errores de convergencia en las simulaciones. De esta manera, el caudal que mueve la bomba de calor en el *timestep* fijado para la simulación nunca es superior a un tercio del volumen total del tanque de la bomba de calor. Se define timestep como el intervalo de tiempo establecido en el cálculo de los resultados de las simulaciones.

7.2.3 Tanques de almacenamiento

Los diferentes tanques de almacenamiento en TRNSYS se definen a partir del *Type 4a: Stratified Storage Tank (Storage Tank; Fixed Inlets; Uniform Losses)*, en los que hay que dimensionar principalmente:

- ✓ Volumen del tanque
- ✓ Calor específico del fluido
- ✓ Densidad del fluido
- ✓ Coeficiente de pérdidas del tanque
- ✓ Altura del tanque

En TRNSYS se puede encontrar una breve explicación del type a elegir para conocer su funcionamiento. De esta manera, se explica: “*El rendimiento térmico del tanque de almacenamiento de energía sensible lleno de fluido, sujeto a estratificación térmica, se puede modelar suponiendo que el tanque consiste en N ($N \leq 15$) segmentos de igual volumen totalmente mezclados. El grado de estratificación se determina por el valor de N . Es decir, si N es igual a 1, el tanque de almacenamiento se modela como un tanque completamente mezclado y no es posible ningún efecto de estratificación. El Type 4 modela un tanque estratificado que tiene posiciones de entrada fijas definidas dentro del código. El fluido caliente de entrada se agrega al nodo del tanque que se*

encuentra debajo del primer calentador auxiliar. El fluido frío de entrada al tanque se introduce en el nodo inferior. Los tamaños de los nodos no son necesariamente iguales. La banda muerta de temperatura en los termostatos del calentador está disponible. Esta instancia asume además que las pérdidas de cada nodo del tanque son iguales y no computan las pérdidas en el tiro de gas del calentador auxiliar”. [10]

Se ha seleccionado este type por estar basado en un modelo robusto que proporciona buena precisión a la vez que mantiene una complejidad razonable de los parámetros.

En cuanto a los parámetros a definir, el coeficiente de pérdidas del tanque se aproxima a 3 kJ/m²·K·h. Asimismo, el calor específico y la densidad del fluido se fijan los valores propios del agua (4.19 kJ/kg·K y 1000 kg/m³).

El volumen del tanque, de forma inicial se ha calculado siguiendo la suposición de estimarlo como la cantidad de agua que pasa a través del tanque en 10 minutos. De esta forma se obtiene un volumen del tanque de 3.81 m³.

Para la altura del tanque, se aproxima en función del volumen. Para la elaboración de la expresión correspondiente, se ha consultado un catálogo tipo y, a partir de los datos recogidos, se ha establecido la siguiente expresión matemática donde se mantiene la relación de aspecto del tanque:

$$h_{tanque} = 1.929 \cdot e^{\frac{1}{3} \cdot \ln(V_{tanque})}$$

Los tanques de almacenamiento desempeñan la función de conectar los equipos generadores de energía (caldera, bomba de calor) con los equipos consumidores (radiadores, duchas). En la definición de la instalación aparecerán tres tanques de almacenamiento:

- Tanque de ACS: Es aquel que almacena el agua caliente proveniente de la bomba de calor o de la caldera y envía la cantidad necesaria de la misma a las duchas para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria.
- Tanque de calefacción: Es aquel que almacena el agua caliente proveniente de la caldera y envía la cantidad necesaria de la misma a los radiadores para cubrir la demanda de calefacción.
- Tanque de la bomba de calor: Es aquel que almacena el agua caliente proveniente de la bomba de calor y envía la cantidad necesaria de la misma al tanque de ACS para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria.

7.3 Funcionamiento de la instalación en TRNSYS

Una vez completada la definición de los equipos que componen la instalación de climatización y ACS, se procede a explicar el funcionamiento de la instalación en el programa en el que el proyecto está apoyado para

estudiar los consumos de los equipos. Para ello, se ilustra a continuación el esquema de simulación de la instalación completa:

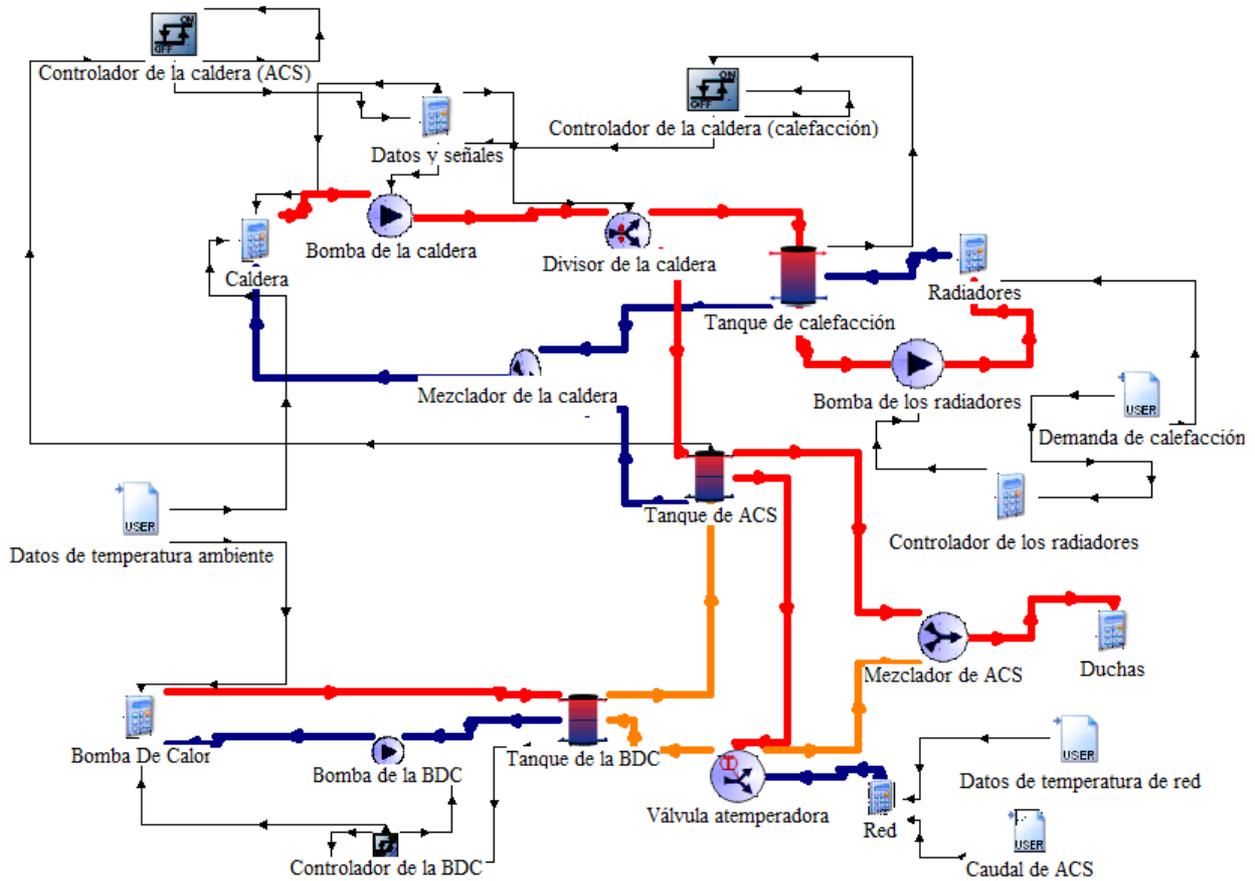


Figura 32. Esquema de la instalación en TRNSYS. Fuente: Elaboración propia.

7.3.1 Lazo de calefacción

El lazo de calefacción en el esquema de simulación de la instalación se muestra a continuación:

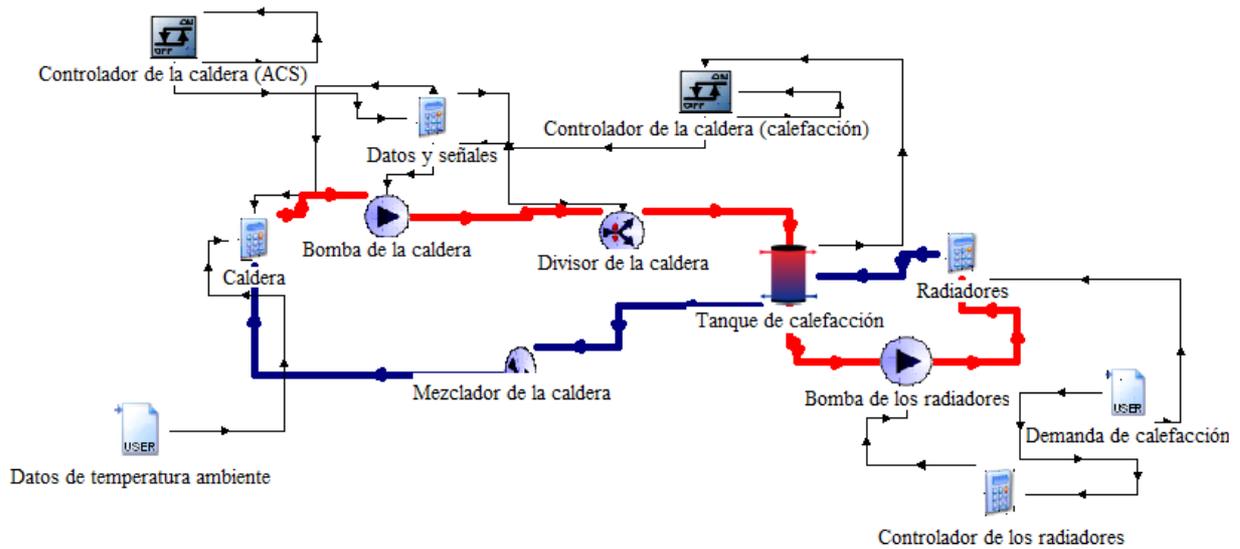


Figura 33. Esquema del lazo de calefacción en TRNSYS. Fuente: *Elaboración propia*.

El *Controlador de la caldera (ACS)* recibe los datos de temperatura de salida del tanque de ACS y tiene la función de garantizar que dicha temperatura se mantenga en el rango entre los 62 °C y los 67 °C. Para ello, envía la señal de activación/desactivación al type *Datos y señales*.

Una función similar es la que realiza el *Controlador de la caldera (calefacción)*, que recibe los datos de temperatura de salida del tanque de calefacción. Dicha temperatura también ha de mantenerse entre los 62 °C y los 67 °C, con lo cual, envía la señal de activación/desactivación al type *Datos y señales* según la situación en la que se encuentre.

En el type *Datos y señales* se recoge la información relativa a dichas señales de la siguiente manera:

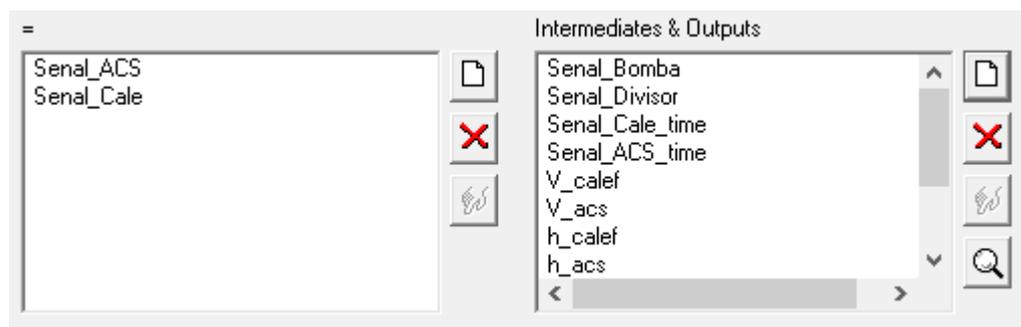


Figura 34. Definición de las señales en TRNSYS. Fuente: *TRNSYS Simulation Studio*.

La función de este type es enviar las señales al *Divisor de la caldera* y a la *Bomba de la caldera*. Al recibir las señales de los controladores, las modifica según el horario de funcionamiento del centro previamente descrito y para ello, se crean las variables *Senal_Cale_time* y *Senal_ACS_time*, que serán las utilizadas para la elaboración de las señales que se envían a los equipos.

La variable *Senal_Bomba* es la que recibe la *Bomba de la caldera*, la cual contiene la orden de activación cuando la *Senal_Cale_time* o la *Senal_ACS_time* también transmitan la señal de activación. Es decir, siempre

que una de las dos señales envíe la orden de activar, la bomba de la caldera iniciará (o continuará) su funcionamiento.

La variable *Senal_Divisor* es la señal que llega al *Divisor de la Caldera* y es más compleja que la que llega a la bomba. Esta señal diferencia las diferentes alternativas posibles combinando las *Senal_Cale_time* y la *Senal_ACS_time*:

- Si la *Senal_Cale_time* transmite la orden de activación pero la *Senal_ACS_time* no lo hace, el divisor enviará todo el caudal proveniente de la bomba al tanque de calefacción.
- Si la *Senal_ACS_time* transmite la orden de activación pero la *Senal_Cale_time* no lo hace, el divisor enviará todo el caudal proveniente de la bomba al tanque de ACS.
- Si la *Senal_Cale_time* transmite la orden de activación y la *Senal_ACS_time* también, se da prioridad a las necesidades de agua caliente sanitaria frente a las de calefacción. De esta manera, envía un 25% del caudal proveniente de la bomba de la caldera al tanque de calefacción y un 75% del caudal al tanque de ACS.

Posteriormente, el *Controlador de los radiadores* recibe los datos de demanda de calefacción y crea una señal de funcionamiento o no según haya o no haya demanda de calefacción llamada *signal_radia*.

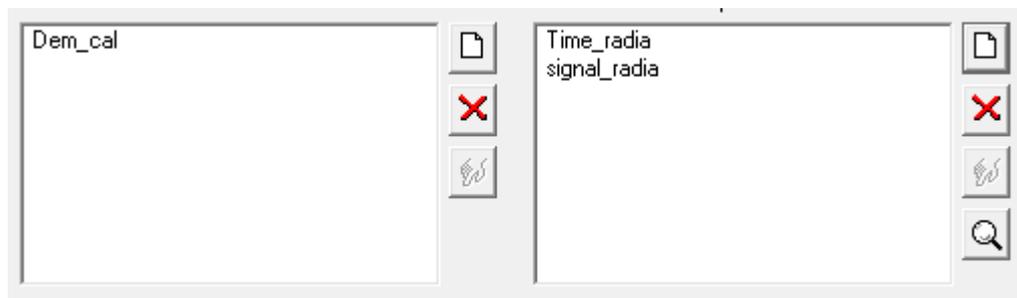


Figura 35. Definición de las señales de los radiadores en TRNSYS. Fuente: TRNSYS Simulation Studio.

De la misma forma que la descrita anteriormente, se modifica esa señal creada acotando los períodos de funcionamiento del centro, creándose la señal *Time_radia*. Esta señal es la enviada a la *Bomba de los radiadores* para controlar su funcionamiento.

Una vez cubierta la demanda de calefacción y ACS, el agua de los radiadores volverá al tanque de calefacción y se suministrará agua de red al lazo de ACS. Igual que el *Divisor de la Caldera*, el *Mezclador de la caldera* tendrá la función de unir ambos flujos procedentes de los tanques de calefacción y ACS y retornarlo a la caldera.

7.3.2 Lazo de agua caliente sanitaria

El lazo de agua caliente sanitaria en el esquema de simulación de la instalación se muestra a continuación:

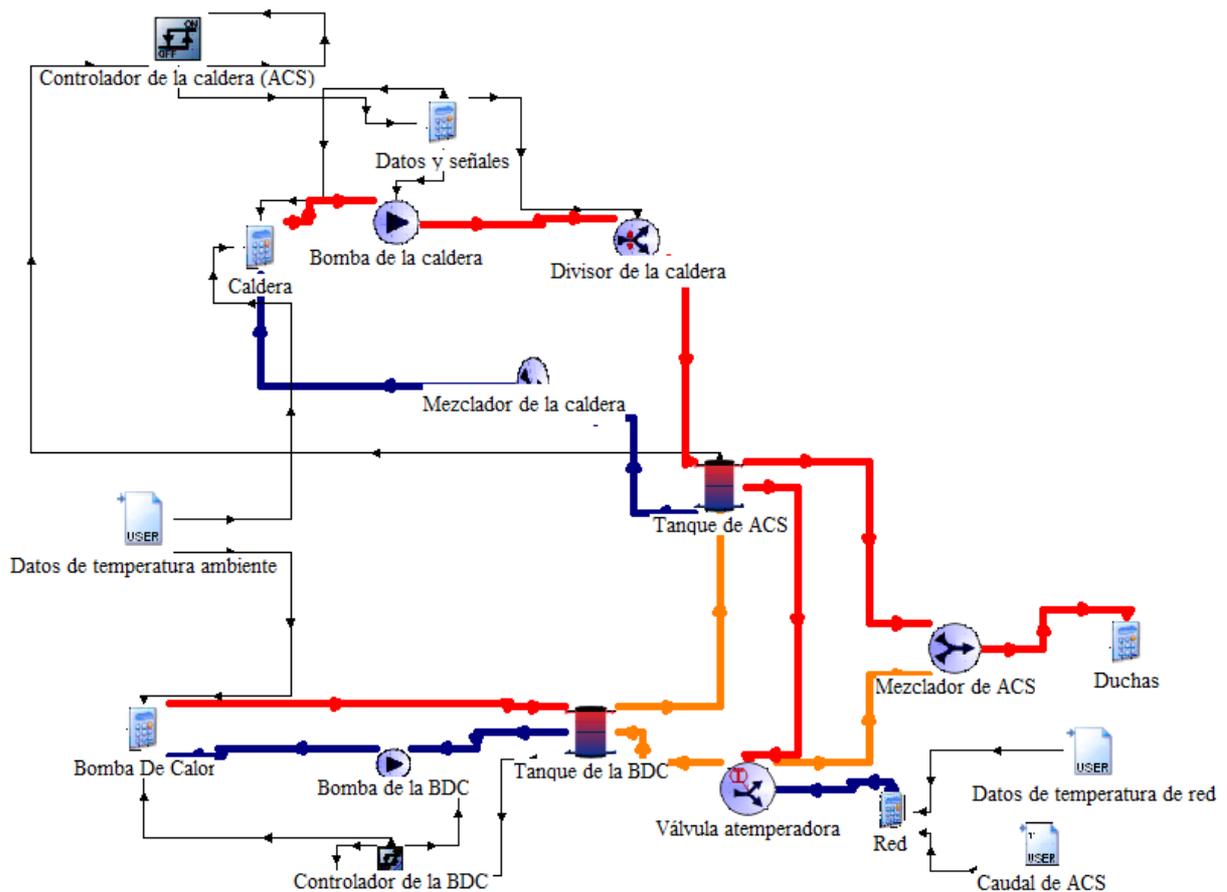


Figura 36. Esquema del lazo de agua caliente sanitaria en TRNSYS. Fuente: *Elaboración propia*.

El *Controlador de la BDC* recibe los datos de temperatura de salida del tanque de la BDC y tiene la función de garantizar que dicha temperatura se mantenga en el rango entre los 62 °C y los 67 °C. Para ello, envía la señal de activación/desactivación al type *Bomba de la BDC*.

El agua que llega al tanque de la bomba de calor pasa posteriormente al tanque de ACS para llegar a las duchas y suplir la demanda de agua caliente sanitaria.

El agua proveniente de red, se hace pasar por la *Válvula atemperadora* que recibe la información de la temperatura de salida del tanque de agua caliente sanitaria. El funcionamiento que sigue se basa en dos alternativas según la información recibida:

1. En caso de que la mezcla del caudal agua de red con el caudal de salida del tanque de ACS resulte un caudal con temperatura superior a 60 °C, el agua de red irá al *Mezclador de ACS* para que se produzca la mezcla descrita y se administre agua caliente sanitaria a las duchas para suplir la demanda.
2. En caso de que la mezcla del caudal agua de red con el caudal de salida del tanque de ACS resulte un caudal con temperatura inferior a 60 °C, el agua de red irá al tanque de la BDC. Al circular el agua de red por el tanque de la BDC servirá de precalentamiento para que posteriormente llegue al tanque de ACS. Finalmente, cuando se alcance la temperatura suficiente, el agua de salida del

tanque de ACS pasará por el *Mezclador de ACS* que, junto con el agua de red, llegará a las duchas.

Es importante recalcar el hecho de que la temperatura de las duchas tiene que estar a 60 °C ya que así lo exige la normativa referente a agua caliente sanitaria.

7.4 Verificación del modelo

Todo ciclo termodinámico debe verificar que cumple el primer principio de la termodinámica, esto es, la suma de entradas y salidas de calor debe ser igual a cero. Dicho de otra forma, el calor cedido por el sistema será igual al trabajo recibido por el mismo, porque como dijo Lavoisier, “*la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma*”.

La verificación se ha realizado a partir de una simulación con un paso de tiempo de 10 minutos, obteniéndose así un total de 52564 valores para cada una de las variables a analizar, que son:

- ✓ Potencia real de la caldera
- ✓ Pérdidas energéticas en el tanque de calefacción
- ✓ Demanda de calefacción
- ✓ Pérdidas energéticas en el tanque de ACS
- ✓ Demanda de ACS
- ✓ Potencia real de la bomba de calor
- ✓ Pérdidas energéticas en el tanque de la bomba de calor

A partir de la potencia real de funcionamiento de la caldera y de la bomba de calor se obtiene el consumo real de los equipos de generación.

Una vez convertido todos los datos a la misma unidad de medida, se agrupan diariamente y mensualmente para facilitar la realización del balance. En la instalación se genera energía a partir de los equipos generadores, caldera y bomba de calor. Así como se consume energía para satisfacer la demanda, también se consume energía en forma de pérdidas de calor en los tanques de almacenamiento.

Para el correcto cumplimiento de los balances, la diferencia entre la energía generada y consumida en la instalación debería de ser nula. Se comprueba el cumplimiento del primer principio de la termodinámica ilustrando los resultados:

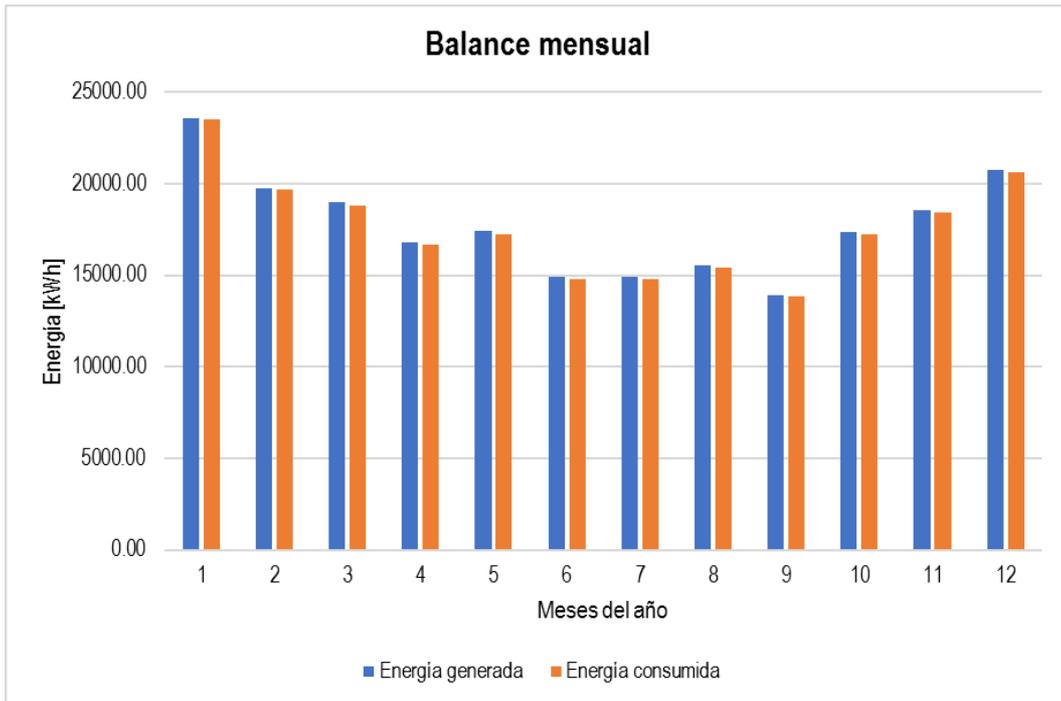


Figura 37. Balance mensual de la instalación. Fuente: Elaboración propia.

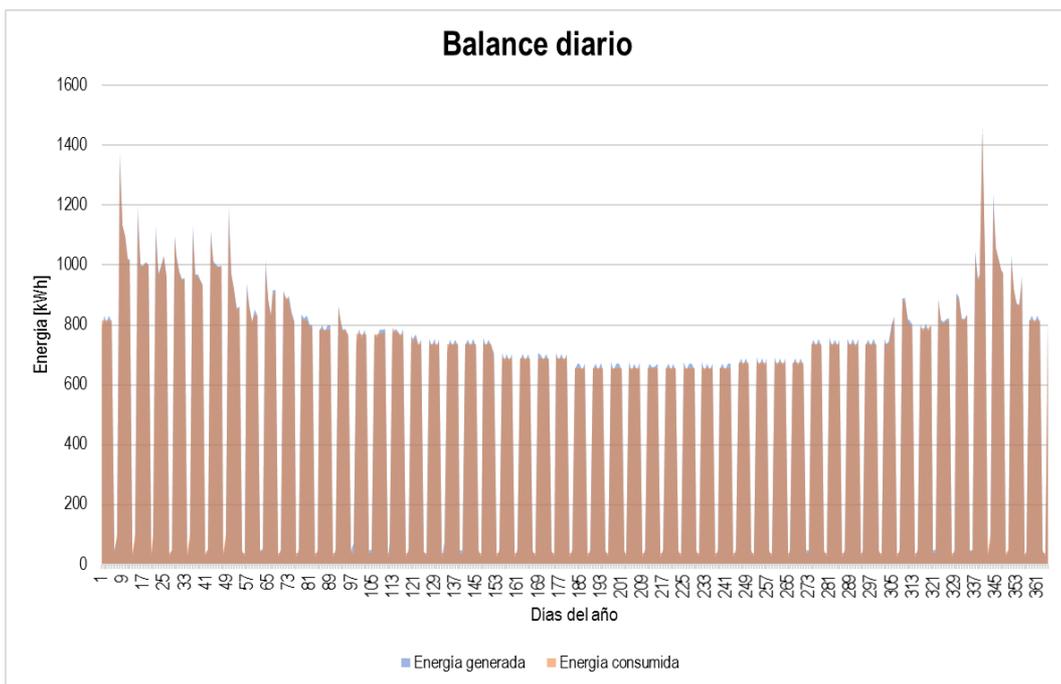


Figura 38. Balance diario de la instalación. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver en las ilustraciones representadas que los resultados obtenidos son favorables, ya que la diferencia entre la energía consumida y la generada se aprecia que es mínima.

El error anual obtenido en los cálculos es de un 0.67%, por lo tanto el modelo en TRNSYS de la instalación se asume como válido.

8 OPTIMIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN

Para llevar a cabo el dimensionamiento de la instalación, se lleva a cabo un procedimiento similar al seguido en el apartado de reducción de la demanda. Una vez comprobada la validez del modelo, se realiza la optimización del mismo produciendo una serie de combinaciones variando los principales parámetros de la instalación propuesta como son:

- ✓ Potencia nominal de la bomba de calor
- ✓ Rendimiento nominal de la bomba de calor
- ✓ Volumen del tanque de ACS
- ✓ Volumen del tanque de la BDC

Debido a que TRNSYS ofrece una gran cantidad de posibilidades, ya que permite la variación de un gran número de parámetros y configuraciones, se ha optado por la realización de una macro en Excel programada en Visual Basic for Applications (VBA) que hace simulaciones realizando pasadas masivas en TRNSYS y obteniendo los resultados de todas estas. Ello se lleva a cabo a través de llamadas externas a TRNSYS, cambiando del archivo del modelo los valores de las variables a optimizar.

Sin embargo, previo al estudio de las combinaciones, se lleva a cabo un pequeño análisis del consumo de la caldera.

8.1 Consumo de la caldera en función de la instalación

Una vez verificada la validez del modelo, se procede a variar los parámetros decisivos para así comprobar y verificar además, la reducción de consumo que supondría la instalación propuesta frente a la inicial de la que dispone el centro.

Para ello, se tendrán en cuenta cuatro alternativas principales:

1. Instalación inicial con los valores de demanda iniciales.
2. Instalación inicial con los valores de demanda reducida.
3. Instalación propuesta con los valores de demanda inicial.
4. Instalación propuesta con los valores de demanda reducida.

De esta manera, se complementa además el estudio realizado en la Sección 3: *Reducción de la demanda energética* ya que se analiza la influencia que tendría en el consumo de la caldera.

Se parte del modelo de instalación mostrado anteriormente en la Subsección 7.3: *Funcionamiento de la instalación en TRNSYS* para generar los cuatro archivos de simulación. Cabe destacar que para simular los casos referentes a la instalación inicial, se ha mantenido el modelo considerando los valores de potencia de la bomba de calor y volumen de la bomba de calor nulos. Asimismo, la instalación propuesta se ha diseñado con unos valores provisionales de potencia nominal de la bomba de calor de 80 kW y rendimiento 3.5 y un volumen del tanque de la bomba de calor de 4 m³.

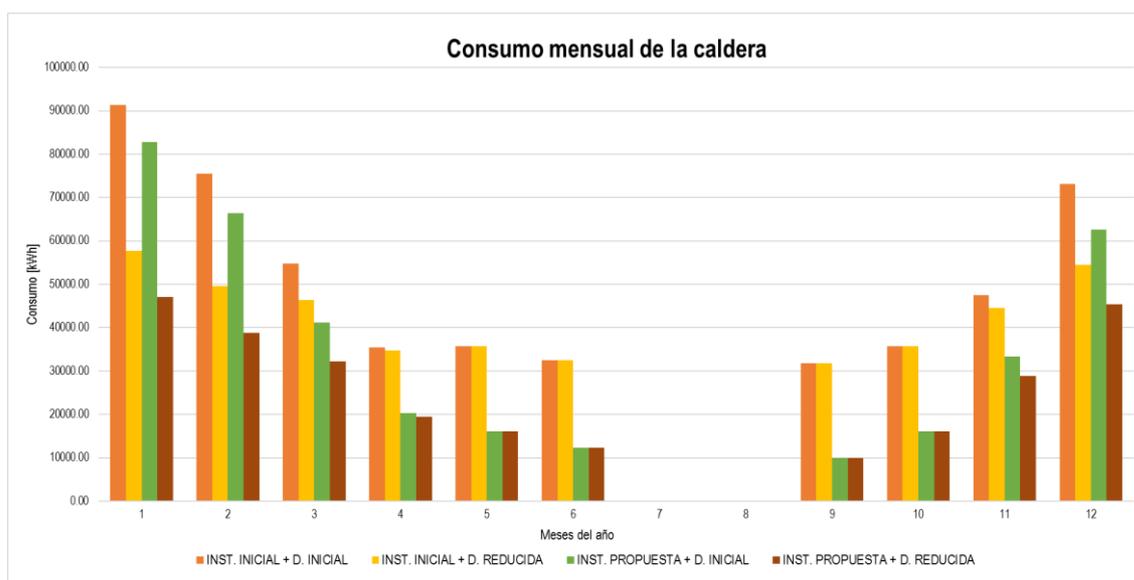


Figura 39. Consumo mensual de la caldera para cada alternativa. *Fuente: Elaboración propia.*

Se puede apreciar, en primer lugar, cómo afecta la reducción de la demanda al consumo de la caldera independientemente de la instalación en los meses de invierno, tal como se muestra en las ilustraciones expuestas a continuación. Así, en los meses previos a la estación estival así como los seguidamente posteriores, se aprecia también que esta reducción es prácticamente insignificante.

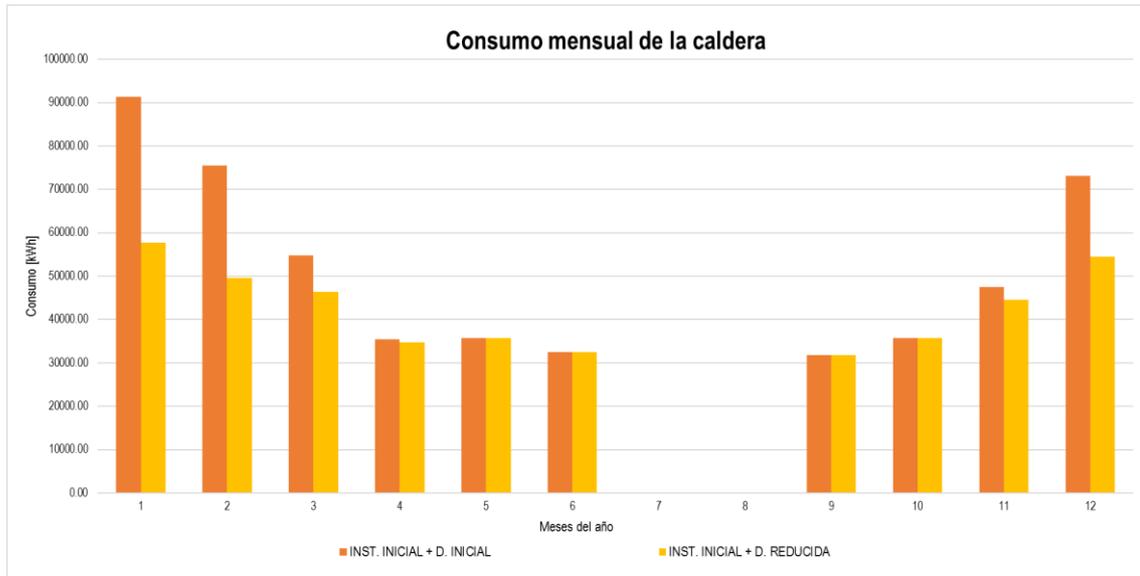


Figura 40. Consumo mensual de la caldera en la instalación inicial. *Fuente: Elaboración propia.*

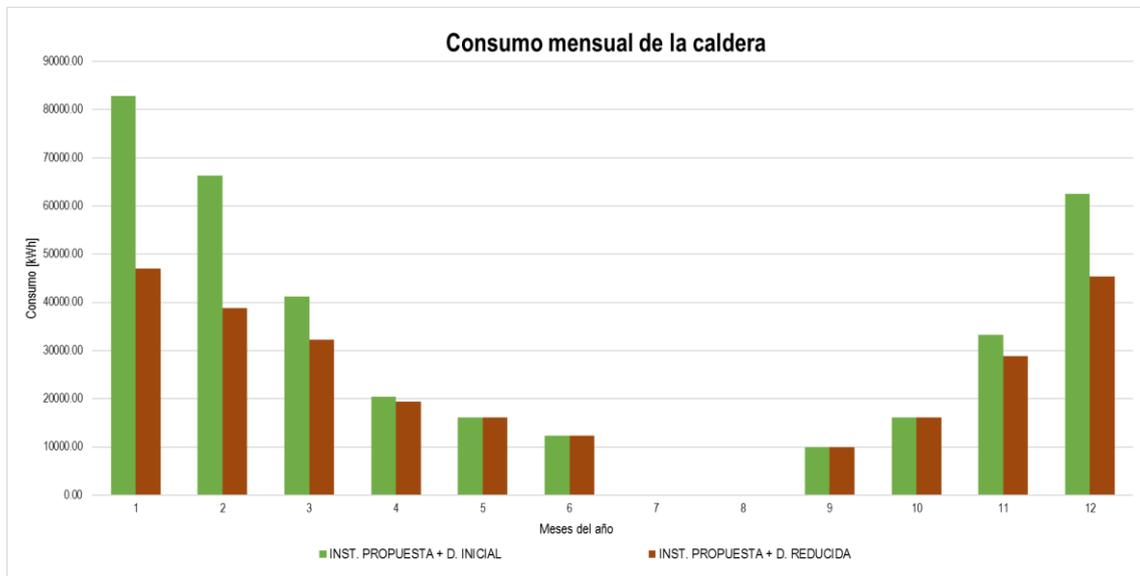


Figura 41. Consumo mensual de la caldera en la instalación propuesta. *Fuente: Elaboración propia.*

También es posible observar la variación en el consumo de la caldera independientemente de la demanda en los meses de calefacción, tal como se muestra en las ilustraciones expuestas a continuación. Con esto se demuestra la capacidad de mejora de la instalación inicial, justificando así el análisis que se hará a continuación para evaluar los parámetros óptimos de la instalación propuesta.

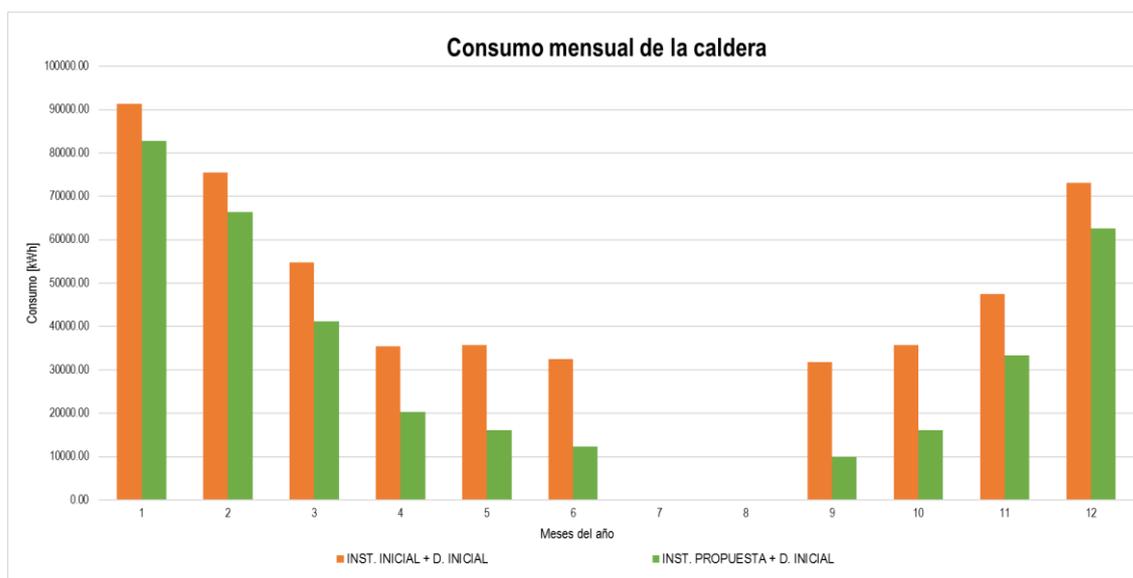


Figura 42. Consumo mensual de la caldera con los valores iniciales de demanda. Fuente: Elaboración propia.

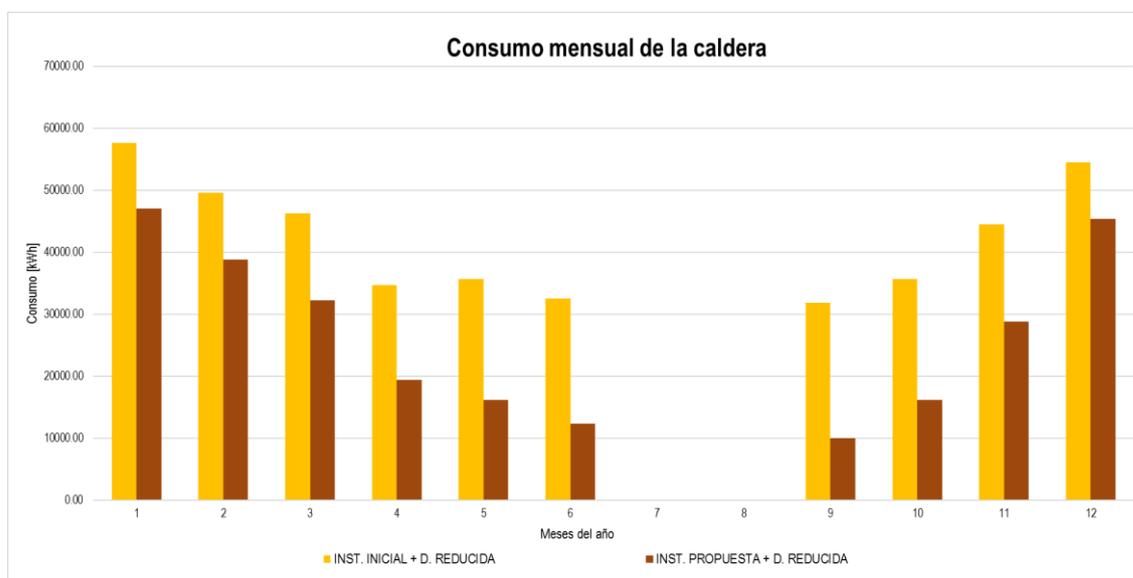


Figura 43. Consumo mensual de la caldera con los valores de demanda reducida. Fuente: Elaboración propia.

Con esto, se pone de manifiesto la capacidad de mejora de la instalación existente, viendo cómo la modificación propuesta supondría una reducción del consumo del principal equipo generador en la instalación inicial así como una mejora de la eficiencia en el lazo de generación de energía del equipo, ya que el funcionamiento de una bomba de calor resulta mucho más eficiente que el de una caldera convencional.

8.2 Catálogo de alternativas para la instalación propuesta

8.2.1 Definición de las diferentes alternativas

Se establecen unos rangos de actuación razonables según los equipos existentes en el mercado para cada una de las variables a dimensionar y se procede a la elección de valores para la creación de las combinaciones.

	Potencia nominal de la BDC	Rendimiento nominal de la BDC	Volumen del tanque de ACS	Volumen del tanque de la BDC
Alternativas	0 kW	2.5	2 m ³	2 m ³
	20 kW	3	3 m ³	3 m ³
	50 kW	3.5	5 m ³	5 m ³
	100 kW	4	7 m ³	7 m ³
	120 kW	4.5	10 m ³	10 m ³
	150 kW		12 m ³	12 m ³
				15 m ³
				20 m ³

Tabla 21. Combinaciones para el dimensionamiento de la instalación. *Fuente: Elaboración propia.*

Los valores seleccionados para cada una de las variables se han escogido según los equipos que se encuentran normalmente en el mercado para instalaciones similares a la estudiada.

En total, se generan 1920 combinaciones posibles a simular. Es necesario introducir los valores de cada una de las variables de estas combinaciones en el modelo de TRNSYS anteriormente explicado y así obtener los resultados necesarios para evaluar la elección del caso óptimo.

Para ello, como se ha comentado anteriormente, se ha optado por la realización de una macro en el programa Excel que modifica cada una de estas variables en el modelo de TRNSYS y, a su vez, hace llamadas externas al propio programa para proceder a la simulación de los casos y así obtener los resultados.

8.2.2 Análisis de los resultados de las combinaciones

Antes de proceder al análisis para la elección del caso óptimo se realiza un análisis de los resultados de las combinaciones. Es necesario estudiar cómo varía el consumo de los equipos al modificar las distintas variables para cerciorarnos del correcto funcionamiento del modelo. Con ello, también se chequeará la coherencia entre la relación de las diferentes variables a optimizar con el consumo de los equipos generadores y conocer la relación de unos equipos con los otros.

Cabe aclarar que para la elaboración de las siguientes gráficas se han mantenido constantes el resto de las variables que no aparecen representadas.

8.2.2.1 Consumo de la caldera en función del volumen del tanque de ACS

Para la obtención del consumo de la caldera en función del volumen del tanque de ACS se han fijado los valores del resto de variables. La potencia nominal de la bomba de calor es de 100 kW, su rendimiento 3.5 y el volumen del tanque de la bomba de calor es de 10 m³.

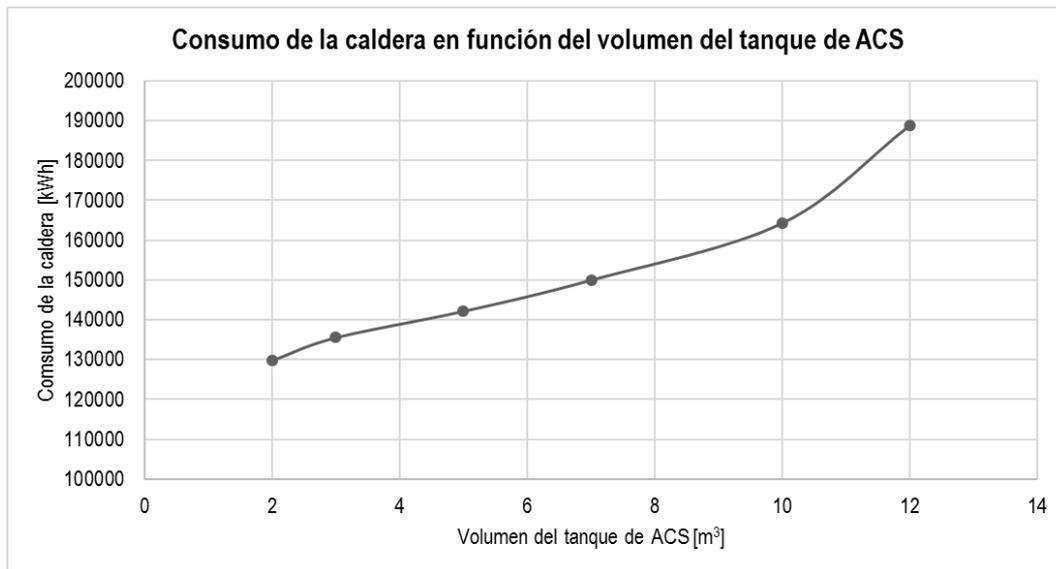


Figura 44. Consumo de la caldera en función del volumen del tanque de ACS. Fuente: *Elaboración propia*.

En la gráfica se puede observar cómo al aumentar el volumen del tanque de ACS aumenta el consumo de la caldera. Ésto es así debido a que el aumento de volumen del tanque conlleva una mayor cantidad de pérdidas de calor al ambiente a través de la superficie del tanque ya que al tener un mayor volumen, la superficie de transmisión de calor con el exterior también es mayor. Esto provoca que, manteniendo fija la potencia nominal de la bomba de calor, aumente el consumo de la caldera.

8.2.2.2 Consumo de la caldera en función de la potencia de la bomba de calor

Se procede a evaluar el consumo que tendría la caldera para cada una de las potencias nominales de la bomba de calor propuestas. De esta manera, se puede predecir cuáles serán las alternativas más interesantes para la optimización de la instalación.

Tal y como se citaba anteriormente, se van a proponer diferentes alternativas para la potencia de la bomba de calor, rendimiento de la bomba de calor y volumen de los diferentes tanques. Si bien es cierto que las posibilidades son muy extensas, donde se hace más necesario estudiar la influencia de las diferentes opciones es en la potencia de la bomba de calor, ya que el rendimiento de la misma y el volumen de los tanques ya cuentan con un rango de opciones más factibles por propia viabilidad.

Para ello, se ha tomado el modelo en TRNSYS expuesto anteriormente y se han hecho varias simulaciones modificando la potencia de la bomba de calor observándose los resultados obtenidos en la variable consumo de la caldera. De esta manera, se obtiene:

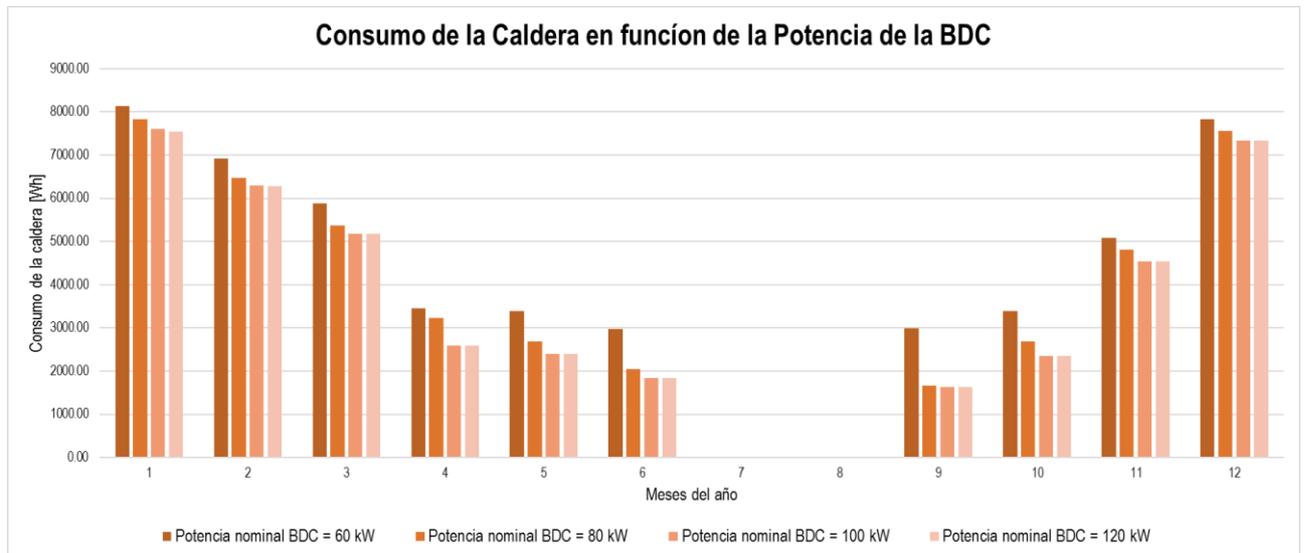


Figura 45. Consumo de la caldera en función de la potencia de la BDC. Fuente: *Elaboración propia*.

Se puede apreciar notoriamente cómo el consumo de la caldera disminuye notablemente al aumentar la potencia de la bomba de calor de 60 kW a 80 kW y a 100 kW. Sin embargo, también se puede apreciar cómo el aumento de potencia de 100 kW a 120 kW no estará justificado ya que la reducción en el consumo de la caldera es prácticamente insignificante. Esto es debido a que, como se explicó anteriormente en la Subsección 7.3: *Funcionamiento de la instalación en TRNSYS*, la bomba de calor genera agua caliente sanitaria para cubrir su demanda pero no se encarga de suplir la demanda de calefacción, con lo cual la caldera siempre tendrá una parte de la generación de energía que no podrá verse disminuida por la aportación de la bomba de calor.

Cabe destacar que la opción de potencia nominal de 150 kW se ha eliminado de las gráficas ya que, como se ha visto, la potencia de 150 kW no será la correspondiente al dimensionamiento óptimo y entorpecía una buena visualización de los resultados.

8.2.2.3 Consumo de la bomba de calor en función del volumen del tanque de ACS

Para la obtención del consumo de la BDC en función del volumen del tanque de ACS se han fijado los valores del resto de variables. La potencia nominal de la bomba de calor es de 100 kW, su rendimiento 3.5 y el volumen del tanque de la bomba de calor es de 10 m³.

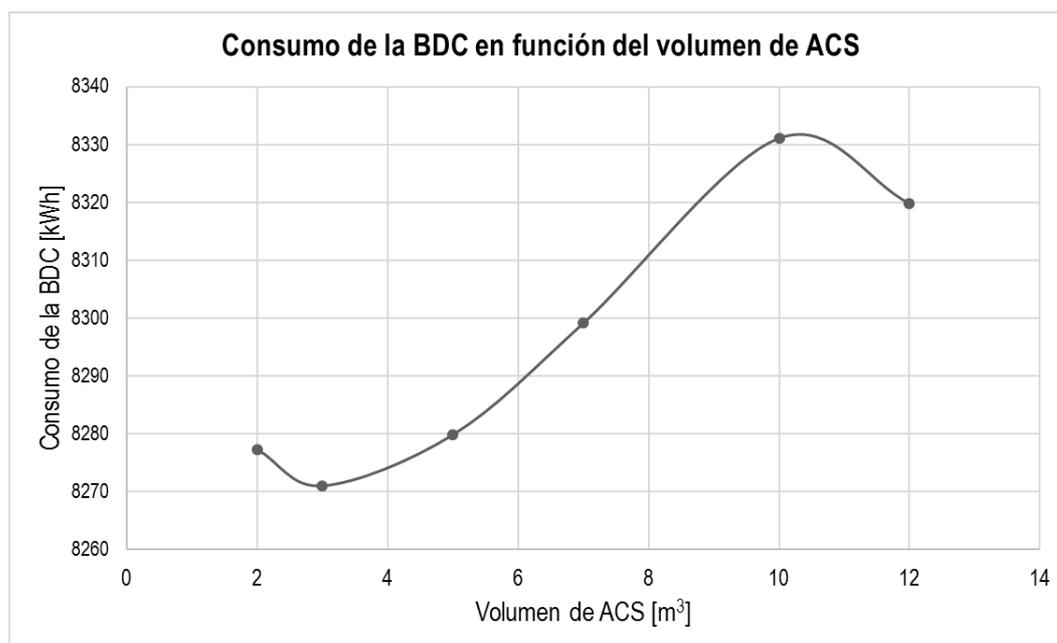


Figura 46. Consumo de la BDC en función del volumen de ACS. *Fuente: Elaboración propia.*

En la gráfica se puede observar que el consumo de la bomba de calor aumenta al aumentar el volumen del tanque de ACS. Lo cual resulta coherente ya que se necesitará un mayor aporte de energía para un mayor volumen a calentar debido a que, igual que ocurría anteriormente con la caldera, aumenta la superficie de transferencia de calor con el ambiente y, por tanto, las pérdidas. Sin embargo, a partir de un volumen de 10 m^3 se aprecia una disminución del consumo de la BDC. Analizando esta gráfica en conjunto con la anterior, se concluye en que para un volumen a partir de 10 m^3 la bomba de calor de potencia nominal 100 kW no es suficiente para cubrir la demanda y requiere del aporte de la caldera. Por ello en la anterior figura se observa como a partir de dicho volumen el consumo de la caldera aumenta en consecuencia.

8.2.2.4 Consumo de la caldera en función del volumen del tanque de la BDC

Para la obtención del consumo de la caldera en función del volumen de la BDC se han fijado los valores del resto de variables. La potencia nominal de la bomba de calor es de 100 kW , su rendimiento nominal de 3.5 y el volumen del tanque de ACS es de 10 m^3 .

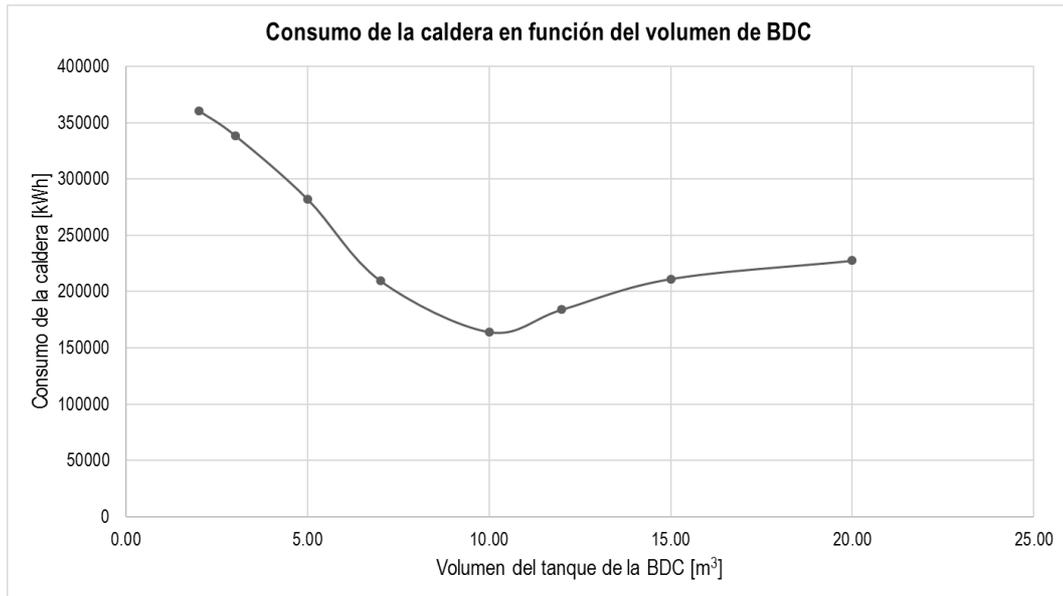


Figura 47. Consumo de la caldera en función del volumen de la BDC. Fuente: *Elaboración propia*.

En la gráfica se puede observar la disminución del consumo de la caldera conforme aumenta el volumen del tanque de la bomba de calor hasta los 10 m³. Este suceso está justificado debido a que al aumentar el volumen del tanque de la bomba de calor, hay una mayor cantidad de agua caliente disponible proveniente de la bomba de calor y por lo tanto la caldera tendrá que aportar menos energía.

Sin embargo, a partir de 10 m³, el consumo de la caldera aumenta debido a que la cantidad de agua que es necesario calentar va siendo cada vez menor, provocando el funcionamiento de la caldera a carga parcial. Este hecho provoca que, a pesar de tener que calentar una menor cantidad de agua, el consumo se ve muy perjudicado, aumentando así aunque los requerimientos de la misma sean menores que a volúmenes más pequeños del tanque de la BDC.

8.2.2.5 Consumo de la BDC en función del volumen del tanque de la BDC

Para la obtención del consumo de la BDC en función del volumen de la BDC se han fijado los valores del resto de variables. La potencia nominal de la bomba de calor es de 100 kW, su rendimiento nominal de 3.5 y el volumen del tanque de ACS es de 10 m³.

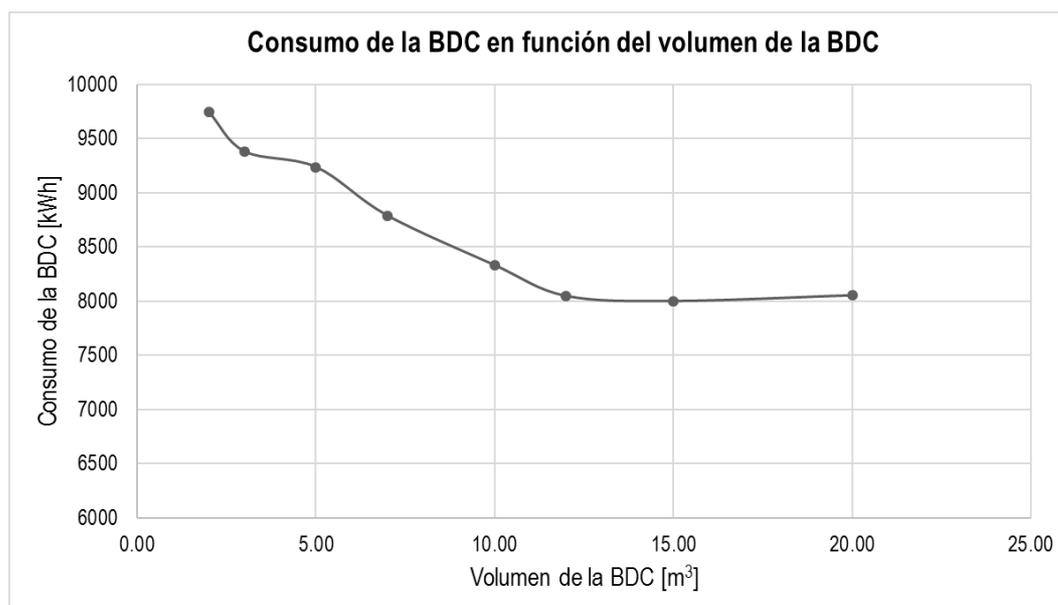


Figura 48. Consumo de la BDC en función del volumen de la BDC. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se puede observar cómo al aumentar el volumen del tanque de almacenamiento de la bomba de calor se produce una disminución del consumo en consecuencia hasta los valores de volumen del tanque de 15 m^3 o 20 m^3 . Esta disminución es debida a que al disponer de un volumen mayor, el tanque de almacenamiento se mantiene a mayor temperatura durante un mayor intervalo de tiempo. Así, se disminuye el efecto de las pérdidas de calor a través de la superficie del tanque. Al alcanzar valores tan altos como son 15 m^3 o 20 m^3 de volumen, no es necesario un aumento de volumen para disminuir el consumo de la bomba de calor ya que al ser cada vez menor la cantidad de agua a calentar, a partir de cierto volumen provoca que la bomba de calor tenga que operar a carga parcial para calentar la cantidad de agua requerida. Esto, al igual que ocurría con la caldera, provoca que aunque la cantidad a calentar sea menor, el consumo se vea perjudicado.

8.2.2.6 Consumo de la BDC en función de su potencia nominal

Para la obtención del consumo de la BDC en función de su potencia nominal se han fijado los valores del resto de variables. El rendimiento nominal de la bomba de calor es de 3.5, el volumen del tanque de ACS y el volumen del tanque de la bomba de calor es de 10 m^3 cada uno.

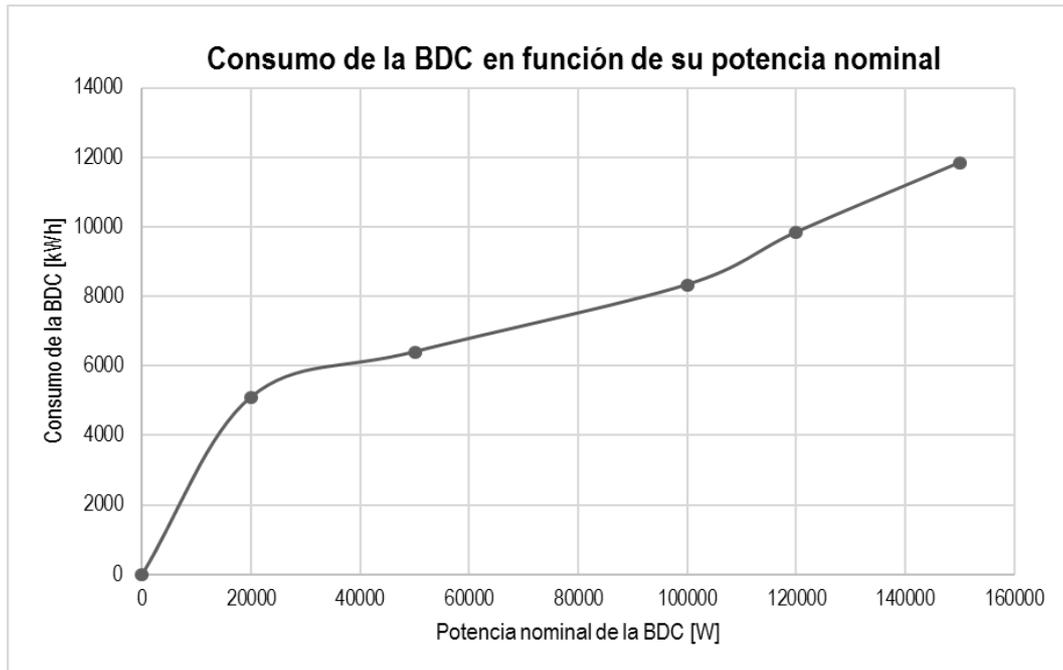


Figura 49. Consumo de la BDC en función de su potencia nominal. *Fuente: Elaboración propia.*

En la gráfica se puede observar cómo al aumentar la potencia nominal de la bomba de calor aumenta consecuentemente su consumo. Es el comportamiento que cabría esperar por lo tanto confirma el correcto funcionamiento de la bomba de calor.

8.2.2.7 Consumo de la BDC en función de su rendimiento nominal

Para la obtención del consumo de la BDC en función de su rendimiento nominal se han fijado los valores del resto de variables. La potencia nominal de la bomba de calor es de 100 kW, el volumen del tanque de ACS y el volumen del tanque de la bomba de calor es de 10 m³ cada uno.

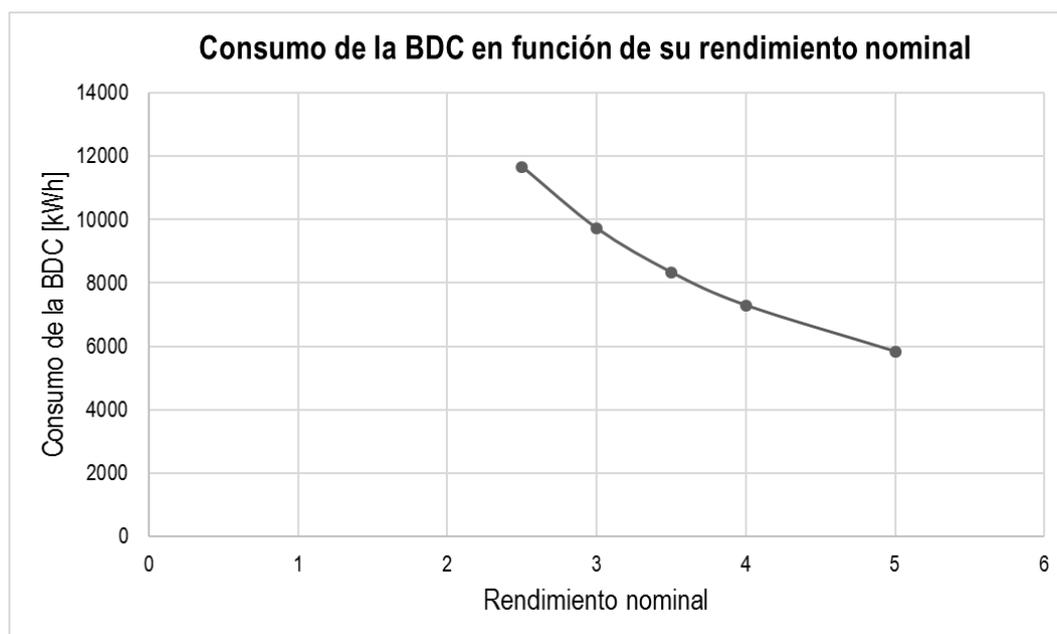


Figura 50. Consumo de la BDC en función de su rendimiento nominal. *Fuente: Elaboración propia.*

En la gráfica se puede observar que al aumentar el rendimiento nominal de la bomba de calor se produce una disminución del consumo en consecuencia. Al igual que en la gráfica anterior, se observa el comportamiento que cabría esperar, por lo tanto confirma una vez más el correcto funcionamiento de la bomba de calor.

Tal y como se ha visto con los resultados obtenidos en las simulaciones, resultan coherentes las relaciones entre la variación de las variables a optimizar y el consumo de los equipos generadores.

8.3 Comparativa entre simulaciones

Una vez verificada y demostrada la relación entre las diferentes variables a optimizar, es interesante realizar una comparativa entre las diferentes alternativas de cada uno de los parámetros para así comprobar una vez más la coherencia de los resultados. Además, con este estudio se pretende facilitar la comprensión del funcionamiento del modelo.

Para ello, se representa la temperatura del agua en distintos puntos de la instalación en función de cada uno de los posibles valores de cada una de las variables a optimizar. Adicionalmente se lleva a cabo la comprobación de las diferencias que aparecen entre los períodos de alta demanda y los de baja demanda.

Se han tenido en cuenta dos períodos de tiempo representativos para el análisis, que son la semana final del mes de Febrero así como un día del final del mismo mes.

8.3.1.1 Temperatura de los tanques en función del rango de potencias de la bomba de calor

Para analizar la variación de la temperatura de cada uno de los tanques de almacenamiento en función del rango de potencia nominal de la bomba de calor, se mantienen constantes todas las demás variables. Es decir, el

rendimiento de la bomba de calor y los volúmenes de los tanques resultan invariables para cada una de las opciones.

1. Tanque de calefacción

Al analizar la temperatura del tanque de calefacción, se obtiene:

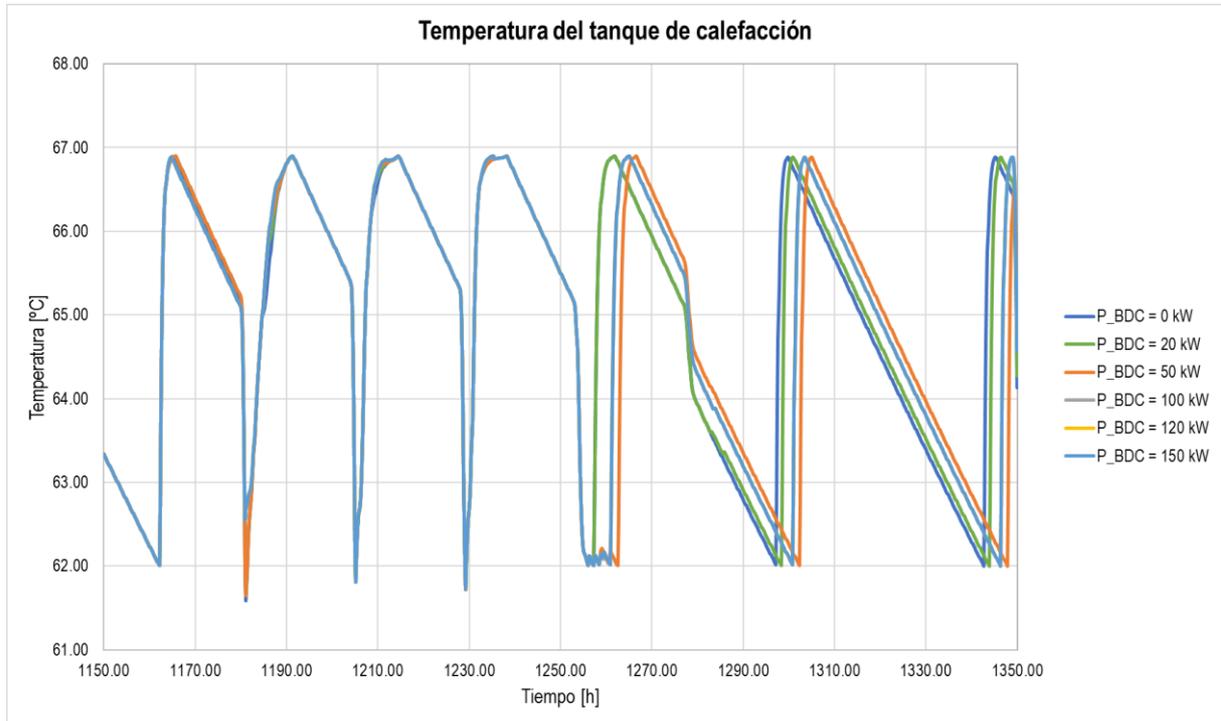


Figura 51. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción con potencia de BDC variable.

Fuente: Elaboración propia.

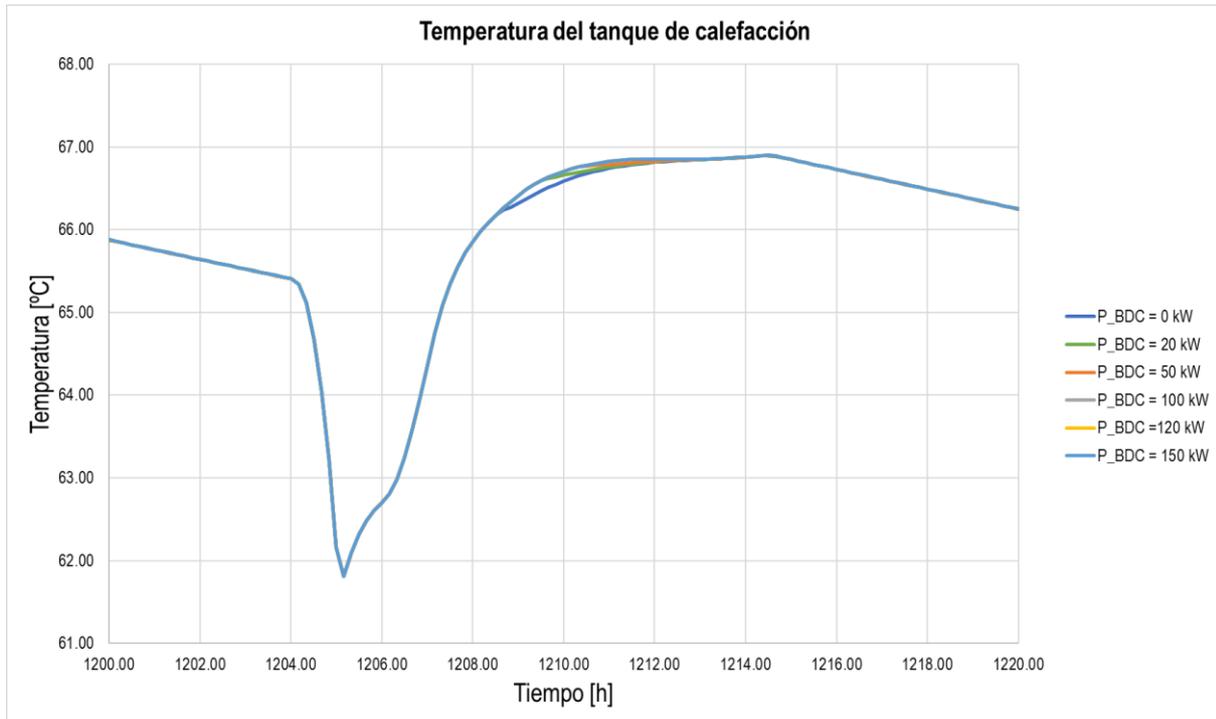


Figura 52. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción con potencia de BDC variable.

Fuente: Elaboración propia.

La bomba de calor, como se ha comentado anteriormente, no estará relacionada con el tanque de calefacción. Por ello, los resultados obtenidos en la gráfica son coherentes ya que la temperatura del tanque de calefacción se ve mínimamente afectada por la variación de la potencia nominal de la bomba de calor.

2. Tanque de agua caliente sanitaria

Al analizar la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria, se obtiene:

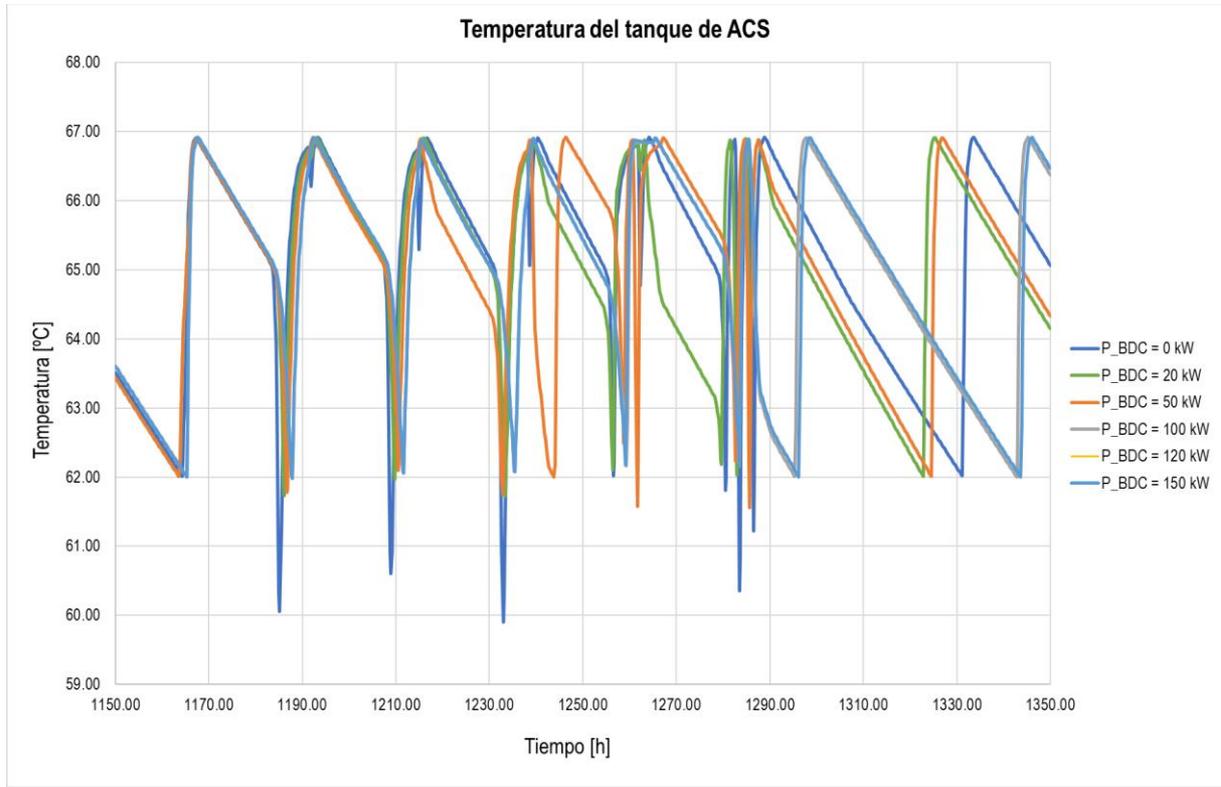


Figura 53. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con potencia de BDC variable. *Fuente: Elaboración propia.*

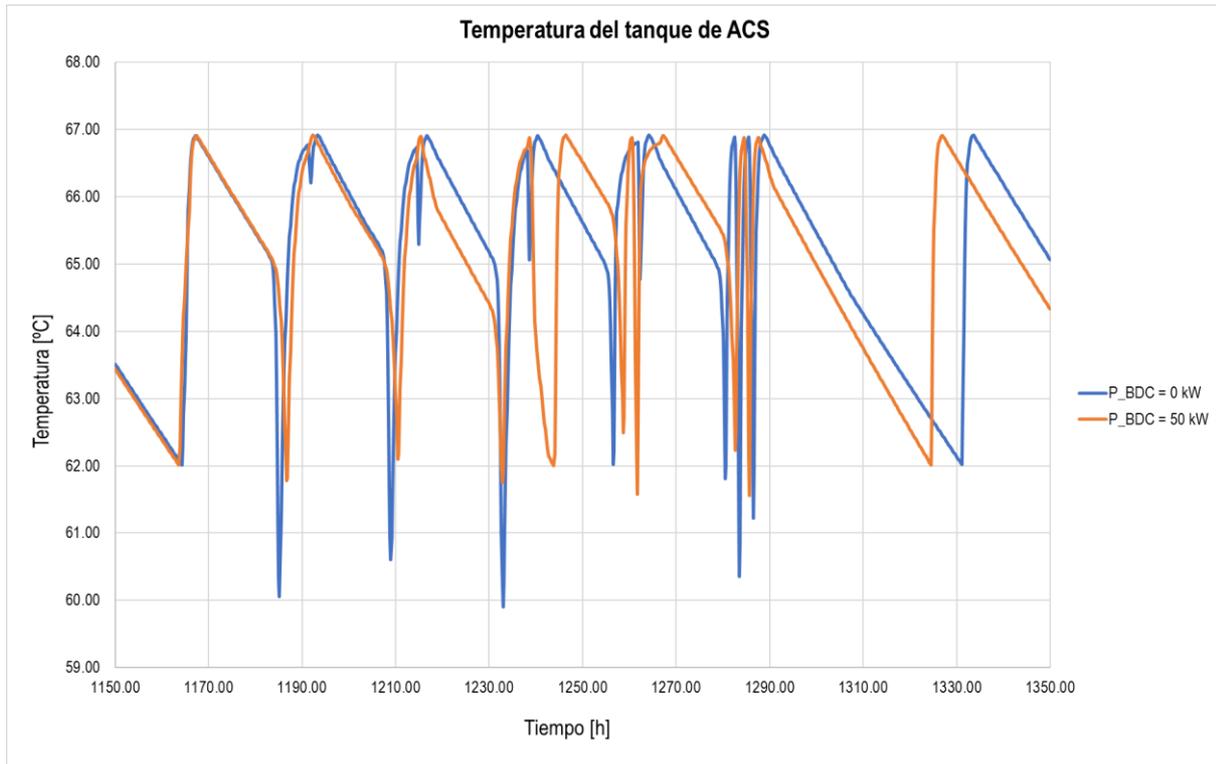


Figura 54. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con potencia de BDC variable acotada.

Fuente: Elaboración propia.

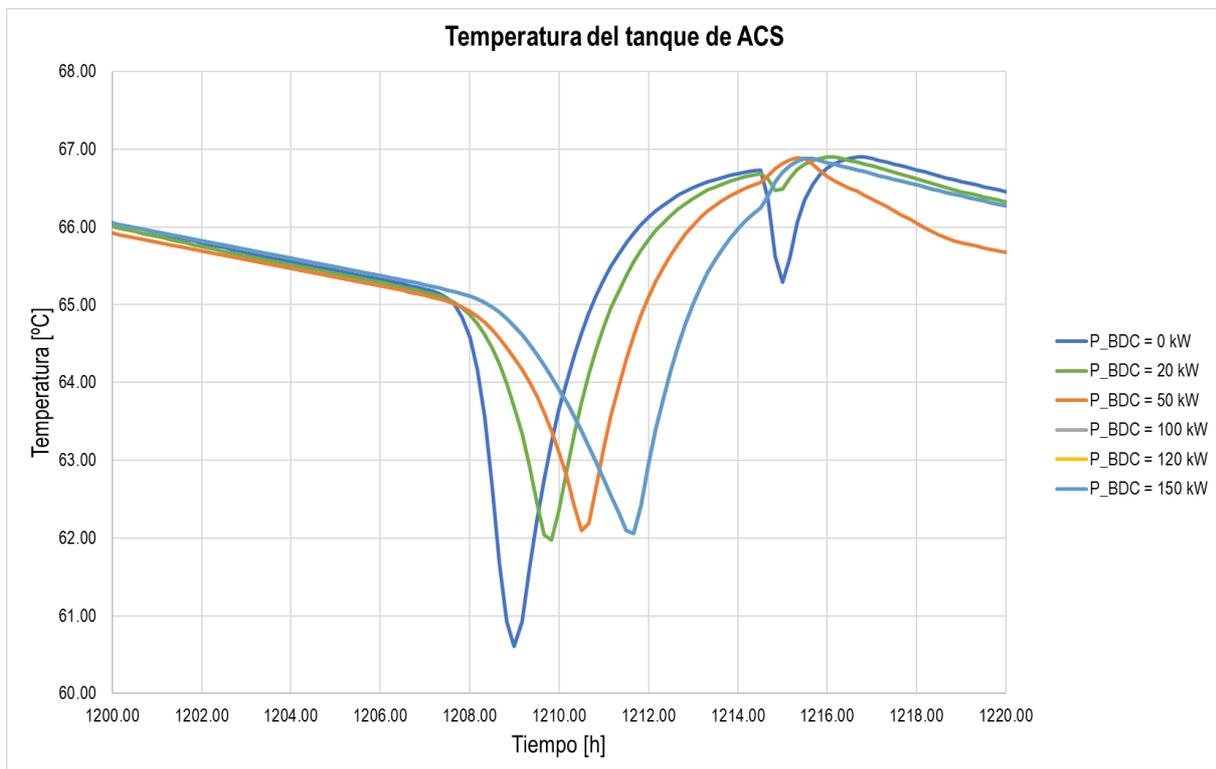


Figura 55. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con potencia de BDC variable. *Fuente:*

Elaboración propia.

En este caso, la bomba de calor sí influye en la temperatura del tanque de ACS. Se puede observar que al no disponer de bomba de calor (potencia nominal de 0 kW), la temperatura del tanque de ACS llega a valores de temperatura por debajo de los 62 °C ya que únicamente está controlada por la caldera que, al tener que satisfacer al mismo tiempo la demanda de calefacción, hace que la bajada de temperatura sea más acusada. Sin embargo, en el resto de los casos, al disponer de bomba de calor, la temperatura del tanque de ACS se mantiene siempre por encima de los 62 °C.

Adicionalmente, se puede observar que a mayor potencia, menor es el intervalo de tiempo que tarda el tanque en subir la temperatura. Esto es así debido a que el agua procedente de la bomba de calor llega al tanque de ACS a mayor temperatura conforme más potencia tenga la bomba de calor. Esto provoca un calentamiento del agua contenida en el tanque de ACS más rápido que si la temperatura del agua procedente de la bomba de calor es menor, lo cual ocurre a menor potencia.

3. Tanque de la bomba de calor

Al analizar la temperatura del tanque de la bomba de calor, se obtiene:

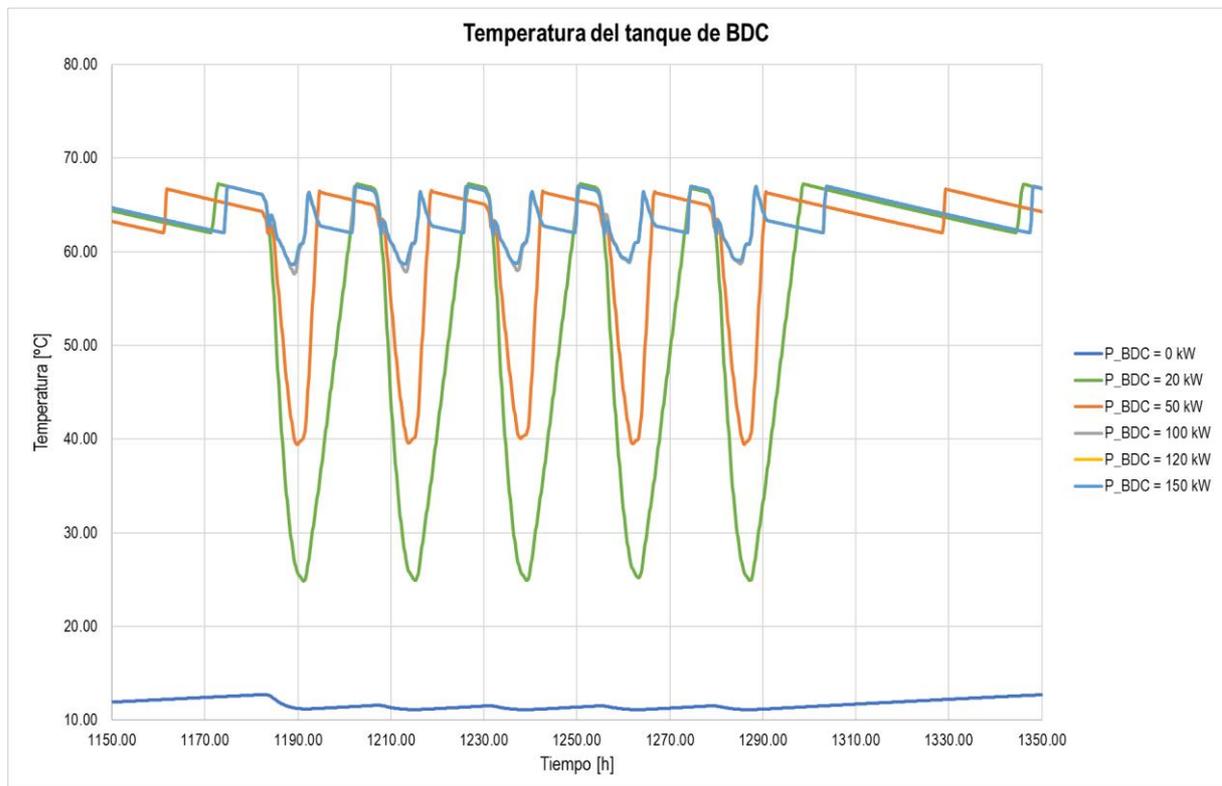


Figura 56. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con potencia de BDC variable. *Fuente: Elaboración propia.*

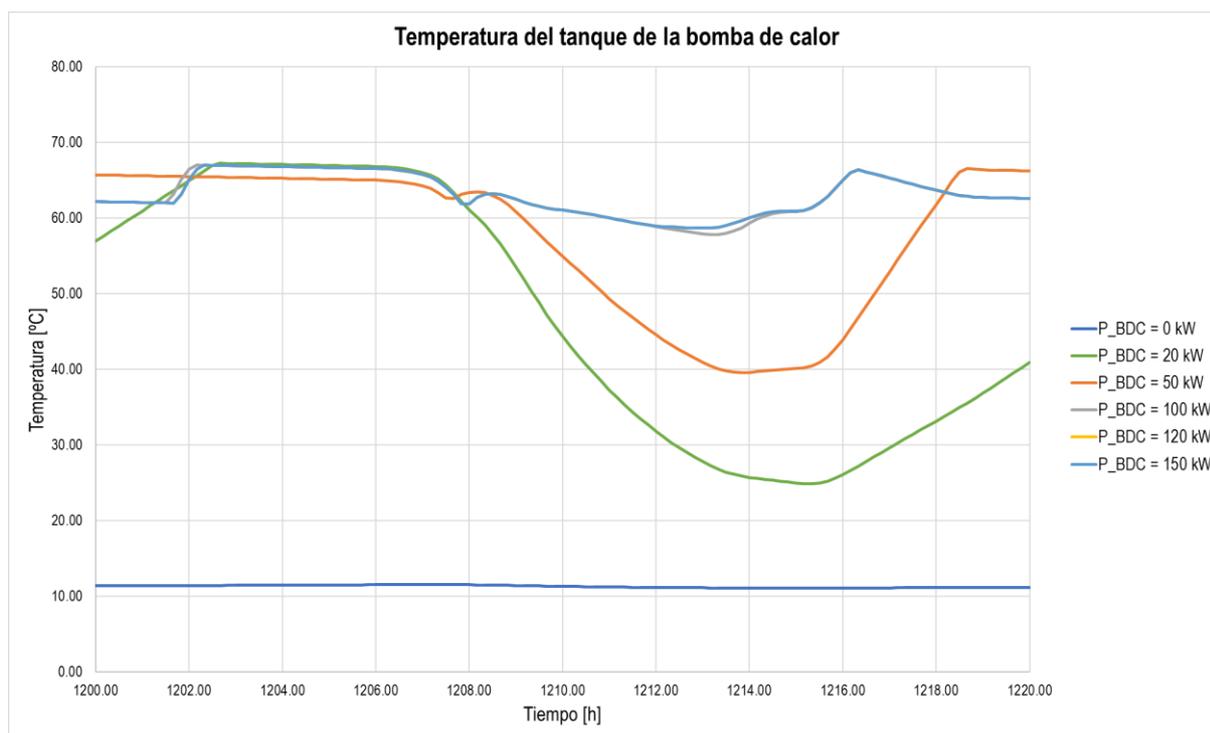


Figura 57. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con potencia de BDC variable. Fuente: *Elaboración propia.*

En este caso, la temperatura del tanque de la BDC depende directamente de la potencia nominal de la BDC. Se puede apreciar cómo al no haber bomba de calor (potencia nominal de 0 kW), la temperatura del tanque se mantiene a temperatura ambiente. Asimismo, conforme la potencia de la bomba de calor aumenta, la temperatura del tanque de la bomba de calor tiene bajadas de temperaturas menos acusadas.

También cabe destacar que a mayor potencia de la bomba de calor, la temperatura del tanque se mantiene en un rango de temperaturas más acotado, disminuyendo así las oscilaciones grandes de la misma. Esto es debido a que al disponer de mayor potencia, como se comentaba anteriormente, la temperatura del agua procedente de la bomba de calor es mayor, con lo cual el agua contenida en el tanque sufre un calentamiento a una velocidad mayor que a potencias menores.

8.3.1.2 Temperatura de los tanques en función del rango de volúmenes del tanque de agua caliente sanitaria

Para analizar la variación de la temperatura de cada uno de los tanques de almacenamiento en función del rango de volumen del tanque de agua caliente sanitaria, se mantienen constantes todas las demás variables. Es decir, la potencia y rendimiento de la bomba de calor así como el volumen del tanque de la BDC resultan invariables para cada una de las opciones.

1. Tanque de calefacción

Al analizar la temperatura del tanque de calefacción, se obtiene:

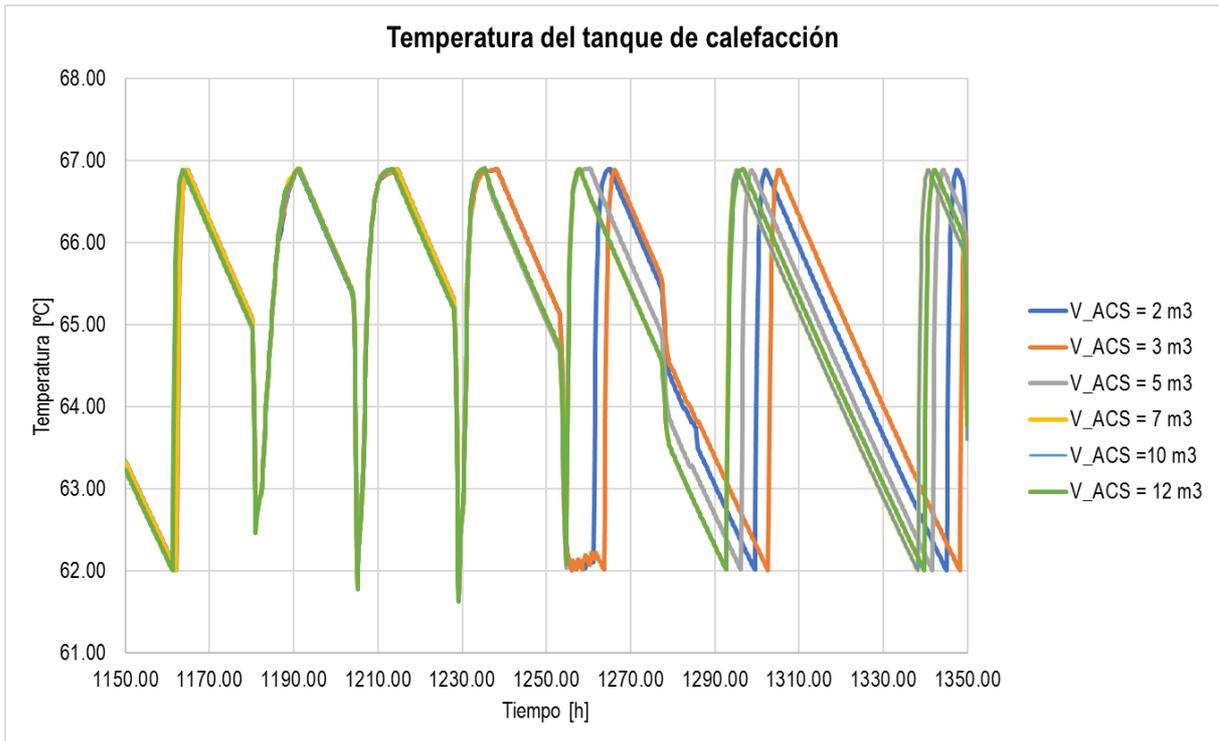


Figura 58. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de ACS variable. Fuente: Elaboración propia.

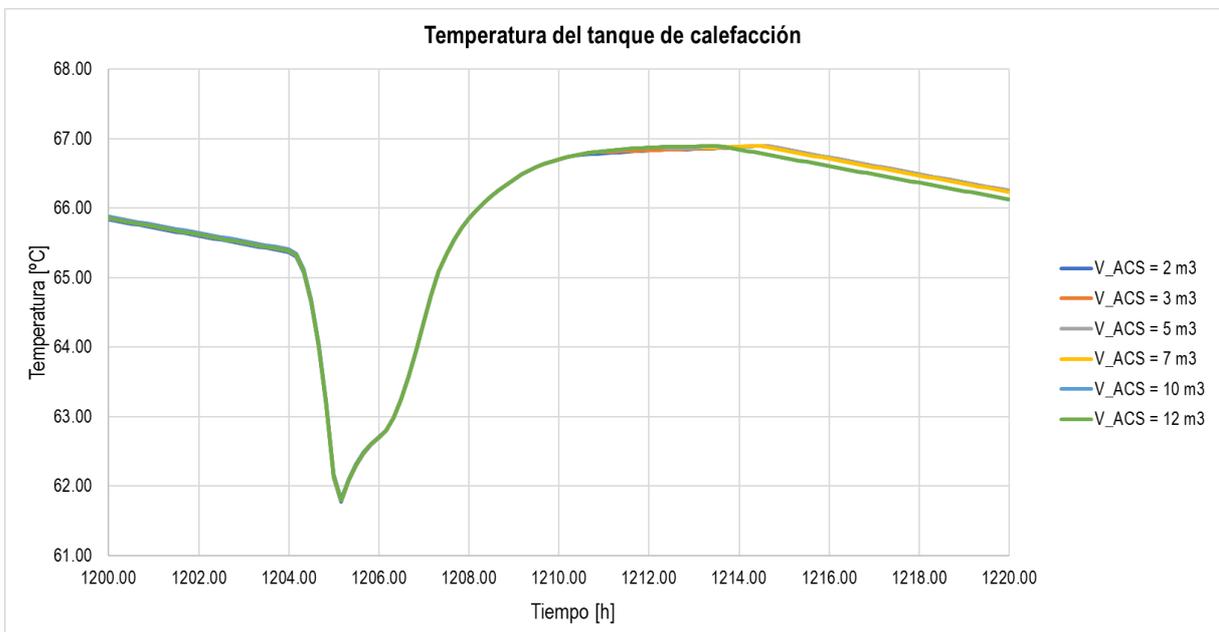


Figura 59. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de ACS variable. Fuente: Elaboración propia.

El volumen del tanque de calefacción no tiene relación alguna con el volumen del tanque de agua caliente sanitaria por estar en lazos diferentes. Por ello, los resultados obtenidos en la gráfica son coherentes ya que la temperatura del tanque de calefacción se ve mínimamente afectada por la variación del volumen del tanque de agua caliente sanitaria.

2. Tanque de agua caliente sanitaria

Al analizar la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria, se obtiene:

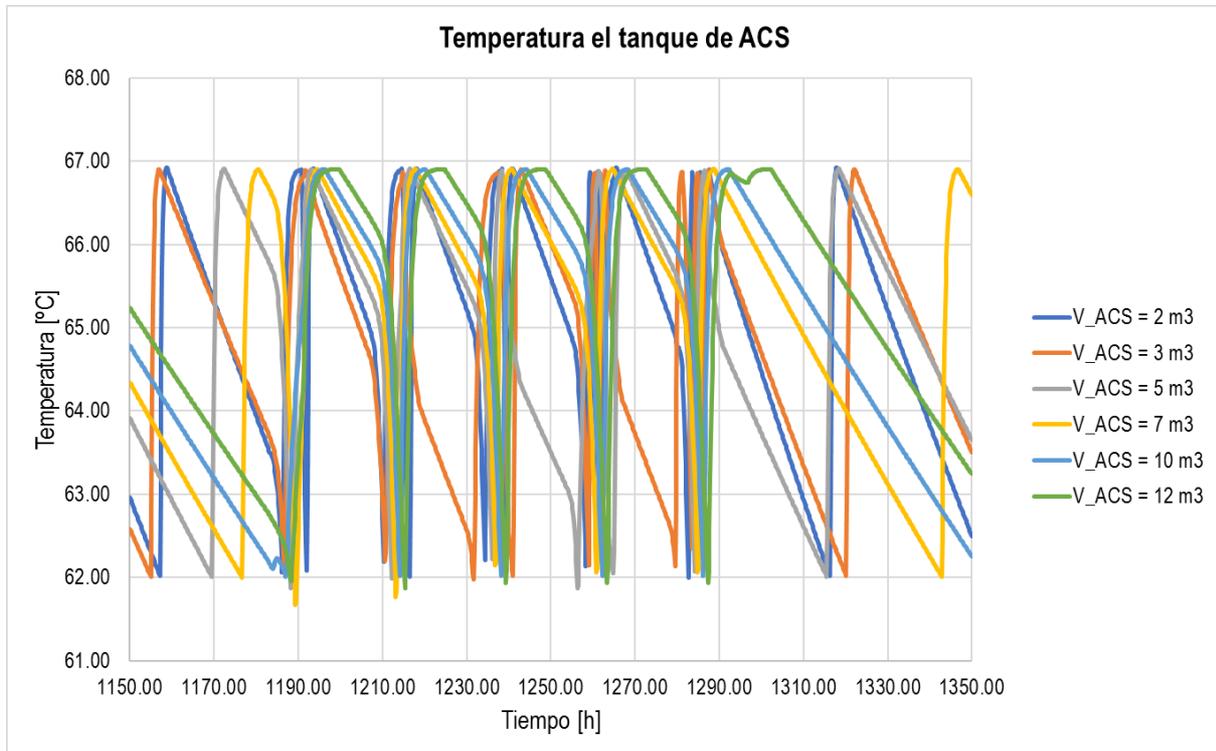


Figura 60. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS variable.

Fuente: Elaboración propia.

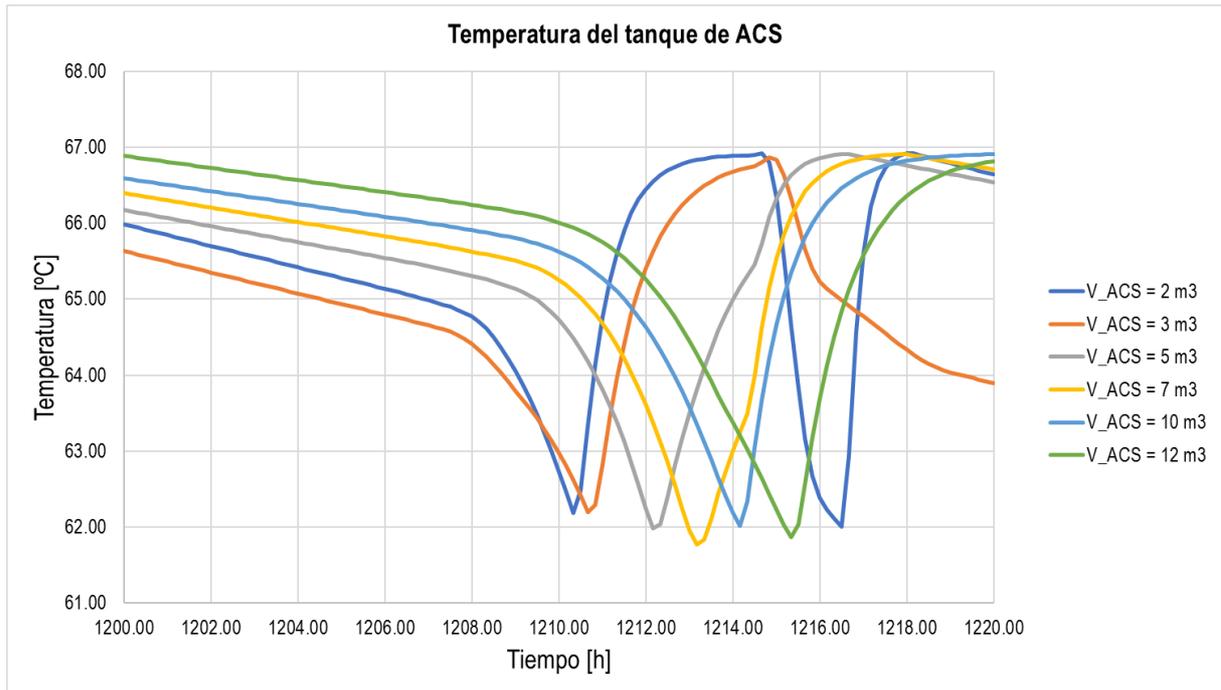


Figura 61. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS variable.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura del tanque de agua caliente sanitaria sí se ve afectada por la variación del volumen del propio tanque. Esto es lógico debido a que a mayor volumen, menor variación de la temperatura a lo largo del tiempo. Resulta evidente que en los momentos de consumo de agua caliente sanitaria éste no tenga demasiada influencia. Sin embargo, se ve en la parte inicial y final de la gráfica de evolución semanal, cómo el efecto de las pérdidas causa un descenso de las temperaturas en menos tiempo para un tanque menor que para uno mayor.

Para observar mejor este fenómeno, se presentan las gráficas anteriores con el menor y el mayor volumen dentro de las opciones:

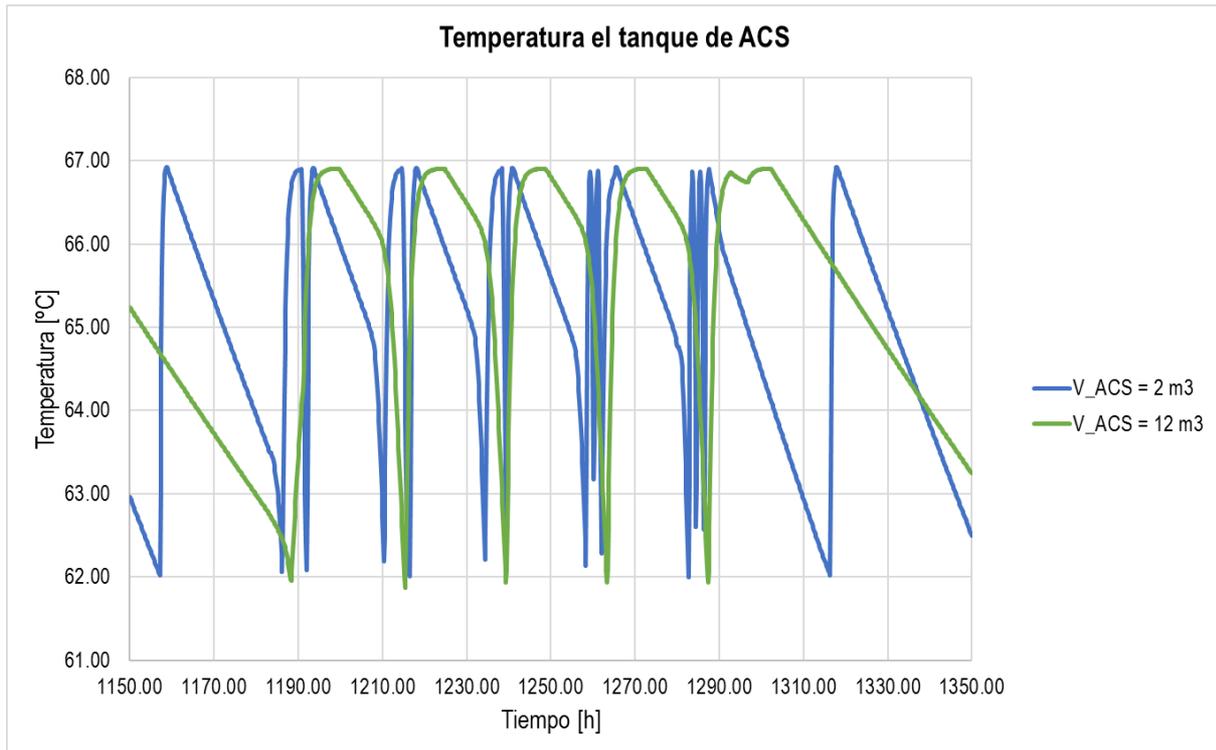


Figura 62. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS de 2 y 12 m³. Fuente: Elaboración propia.

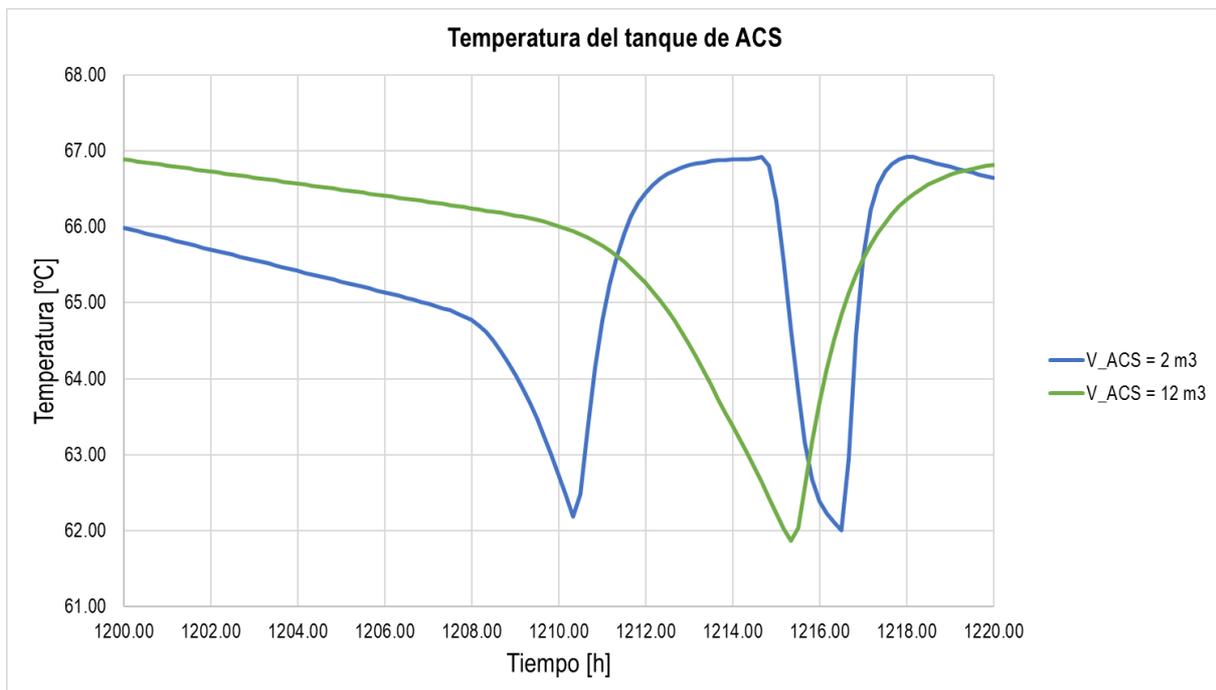


Figura 63. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de ACS de 2 y 12 m³. Fuente: Elaboración propia.

En estas gráficas se aprecia cómo el tanque de menor volumen se enfría y se calienta más rápidamente que el tanque de mayor volumen. Esto es así debido a que al disponer de un mayor volumen de agua caliente,

los momentos de demanda no hacen que la temperatura baje drásticamente ya que el porcentaje de agua del total que se consume es menor que en el caso de un volumen más pequeño.

3. Tanque de la bomba de calor

Al analizar la temperatura del tanque de la bomba de calor, se obtiene:

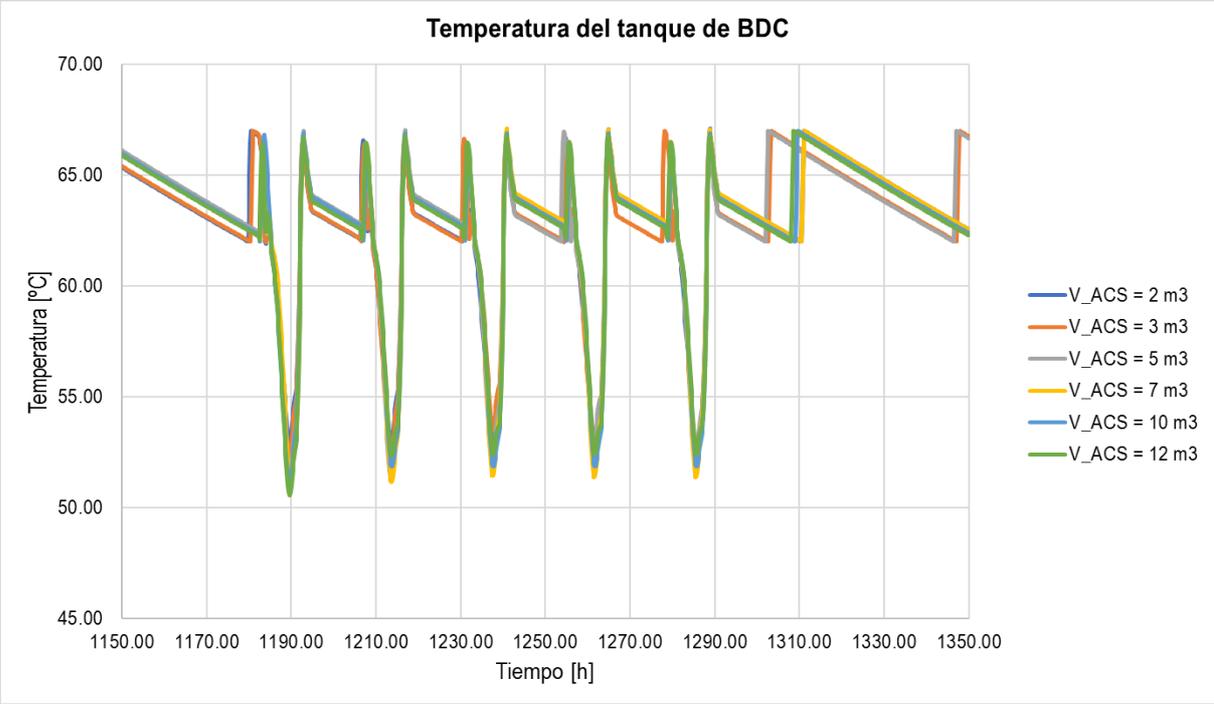


Figura 64. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de ACS variable.

Fuente: Elaboración propia.

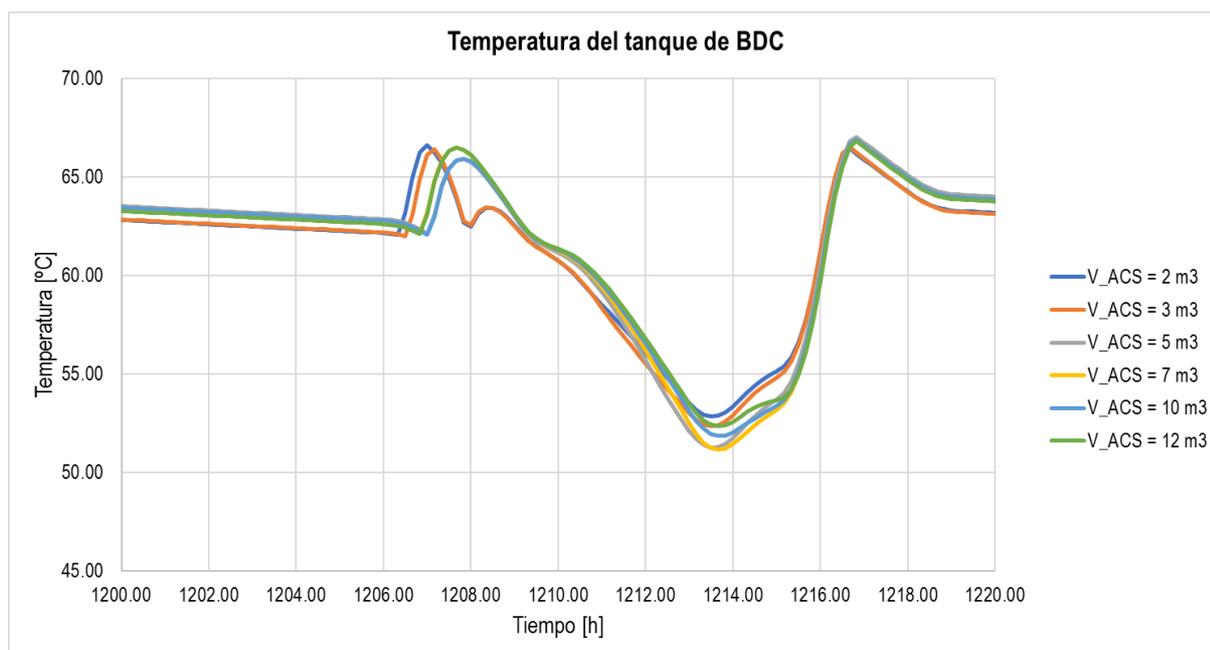


Figura 65. Evolución diaria de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de ACS variable.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen del tanque de la bomba de calor no se ve muy influenciado por la variación del volumen del tanque de ACS. Esto es debido a que el tanque de la bomba de calor supe de agua caliente al tanque de ACS pero no al contrario. Sin embargo sí puede observarse cómo a mayor volumen, se retrasa la activación de la bomba de calor para calentar el tanque de BDC. Esto es debido a lo comentado anteriormente en las gráficas de evolución de temperatura del tanque de ACS: a mayor volumen más tarda en enfriarse y por lo tanto, más tardará en demandar agua caliente proveniente de la bomba de calor.

8.3.1.3 Temperatura de los tanques en función del rango de volúmenes del tanque de la bomba de calor

Para analizar la variación de la temperatura de cada uno de los tanques de almacenamiento en función del rango de volumen del tanque de la bomba de calor, se mantienen constantes todas las demás variables. Es decir, la potencia y rendimiento de la bomba de calor así como el volumen del tanque de ACS resultan invariables para cada una de las opciones.

1. Tanque de calefacción

Al analizar la temperatura del tanque de calefacción, se obtiene:

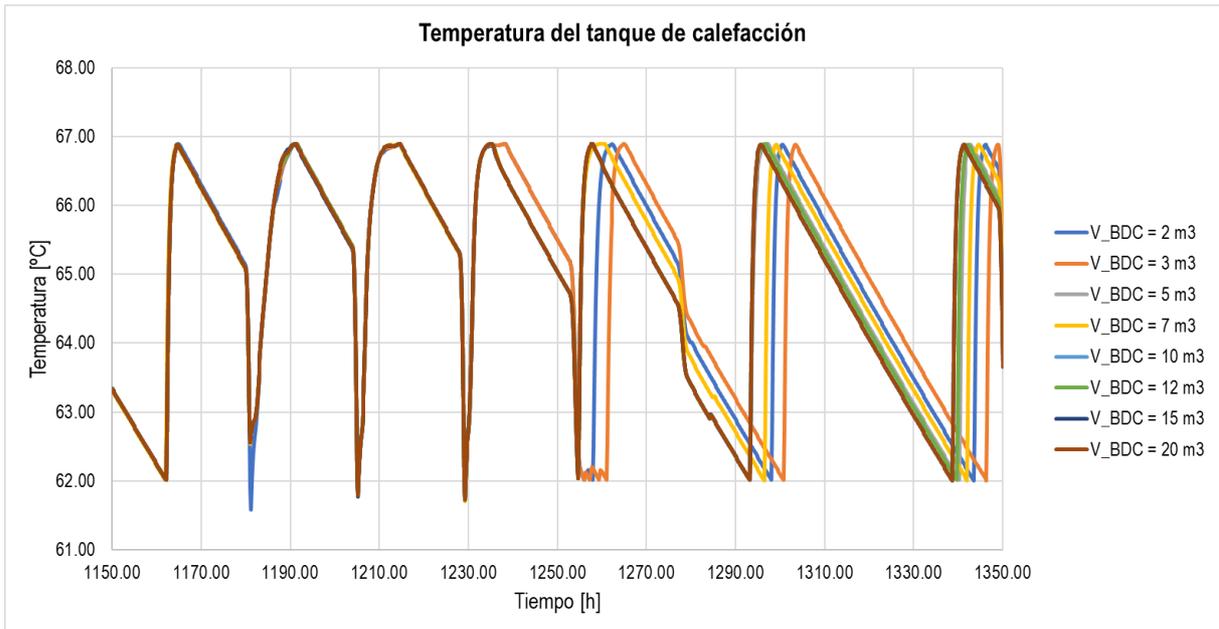


Figura 66. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de BDC variable. Fuente: Elaboración propia.

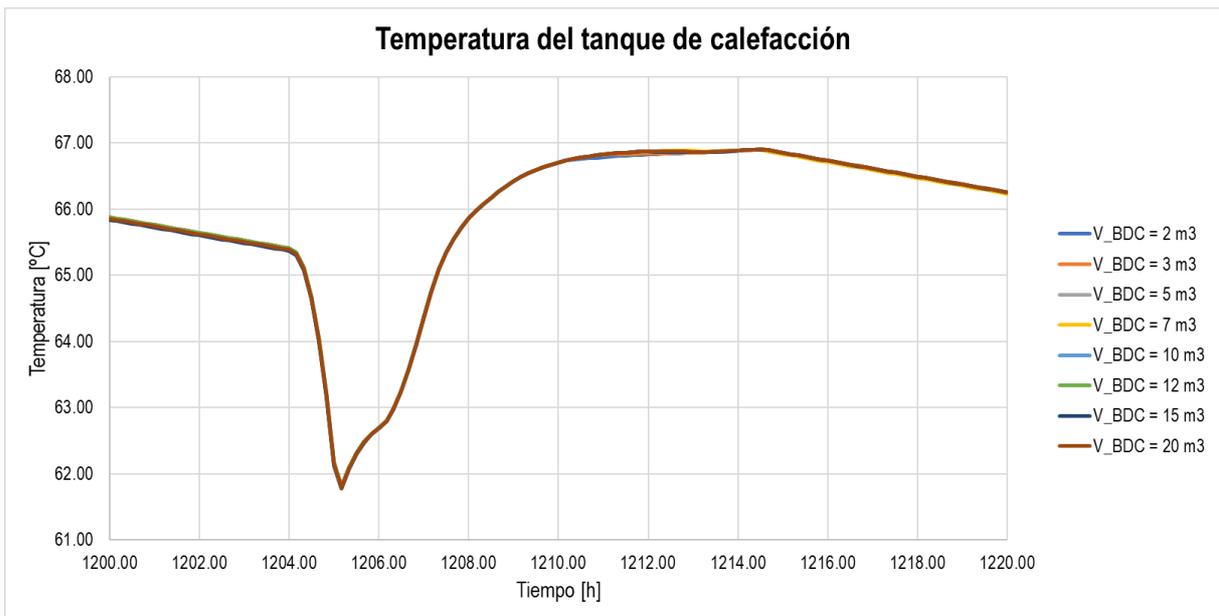


Figura 67. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción con volumen del tanque de BDC variable. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que sucedía con el volumen variable del tanque de agua caliente sanitaria, el volumen del tanque de calefacción no tiene relación alguna con el volumen del tanque de la bomba de calor por estar en lazos diferentes. Por ello, los resultados obtenidos en la gráfica son coherentes ya que la temperatura del tanque de calefacción se ve mínimamente afectada por la variación del volumen del tanque de la bomba de calor.

2. Tanque de agua caliente sanitaria

Al analizar la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria, se obtiene:

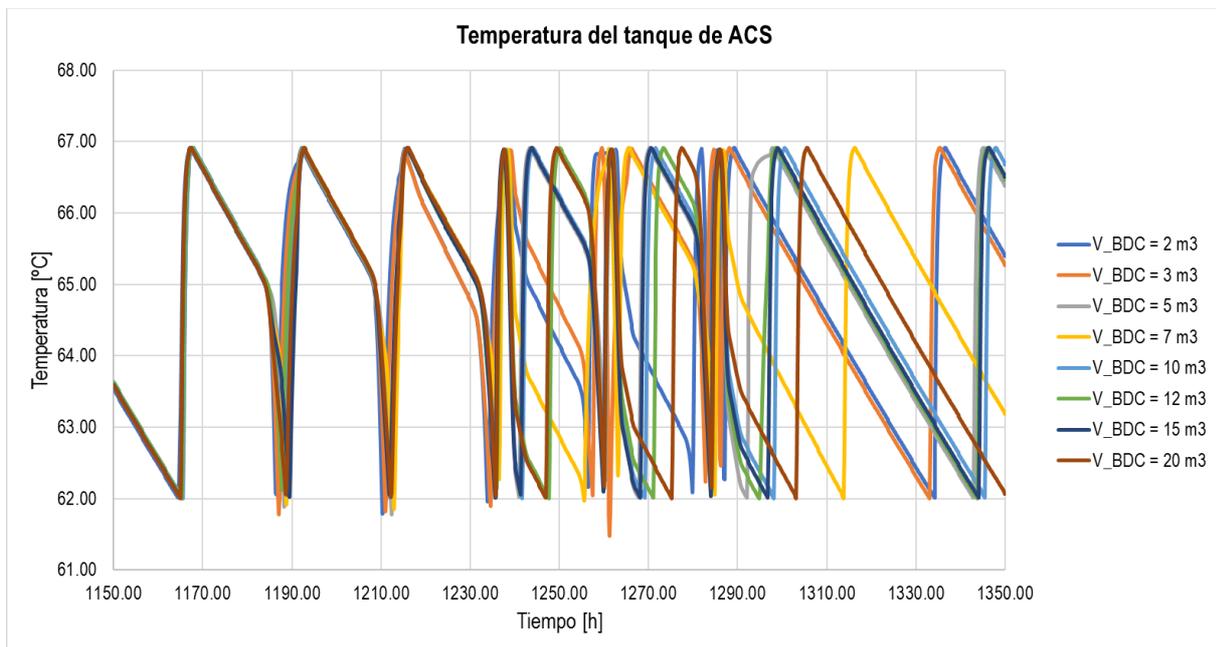


Figura 68. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC variable.

Fuente: Elaboración propia.

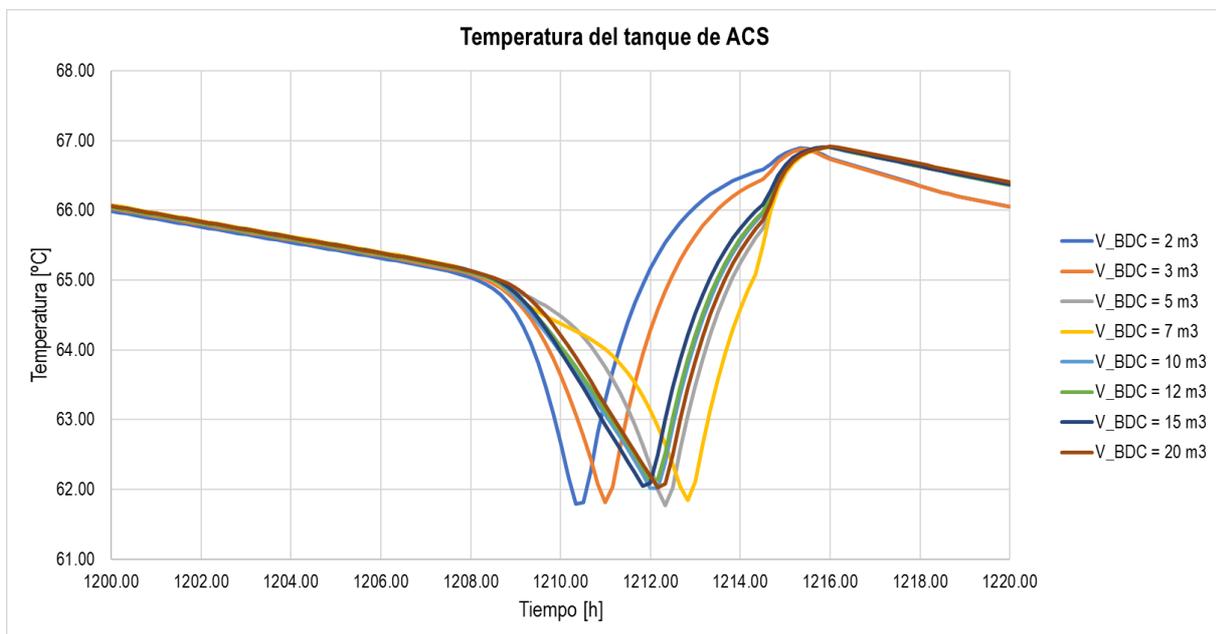


Figura 69. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC variable.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura del tanque de agua caliente sanitaria sí se ve afectada por la variación del volumen del tanque de la bomba de calor ya que es ésta la que suplente al tanque de agua caliente sanitaria cuando es necesario.

Tal y como cabe esperar, a un mayor volumen del tanque de la bomba de calor, la temperatura del tanque de ACS se enfría y se calienta en un intervalo de tiempo diferente.

Para observar mejor este fenómeno, se presentan las gráficas anteriores con el menor y el mayor volumen dentro de las opciones:

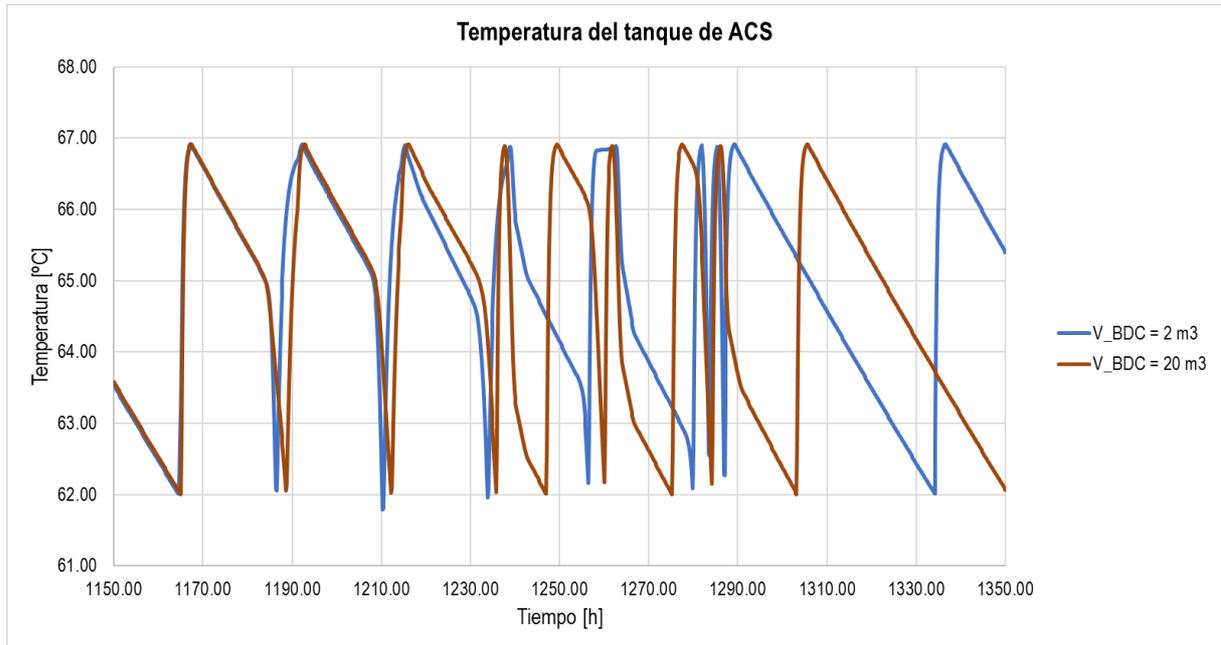


Figura 70. Evolución semanal de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC de 2 m³ y 20 m³. Fuente: Elaboración propia.

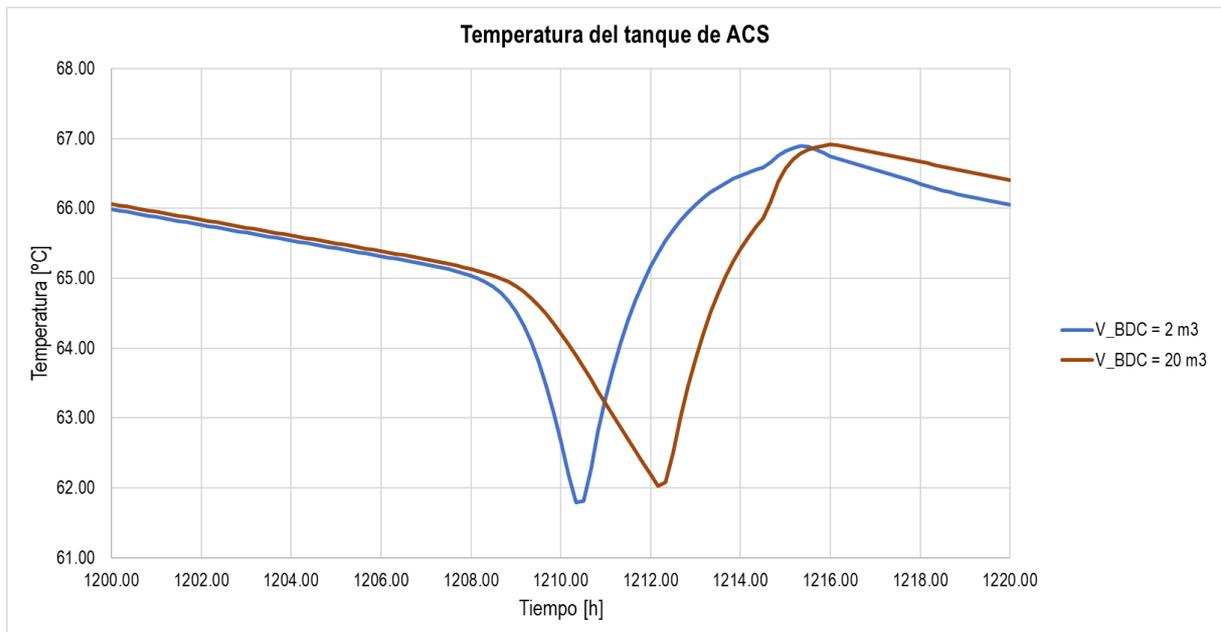


Figura 71. Evolución diaria de la temperatura del tanque de ACS con volumen del tanque de BDC de 2 m³ y 20 m³. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que la variación es menos acusada que al variar el volumen del tanque de agua caliente sanitaria, es posible observar cómo al aumentar el volumen del tanque de la bomba de calor, la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria se mantiene entre 62 °C y 67 °C por más tiempo.

Esto es así debido a que un volumen mayor del tanque de la bomba de calor se traduce en una mayor cantidad de agua caliente disponible para mantener la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria. Es por ello que la bajada de temperatura para un volumen mayor es menos acusada que para volúmenes menores.

3. Tanque de la bomba de calor

Al analizar la temperatura del tanque de la bomba de calor, se obtiene:

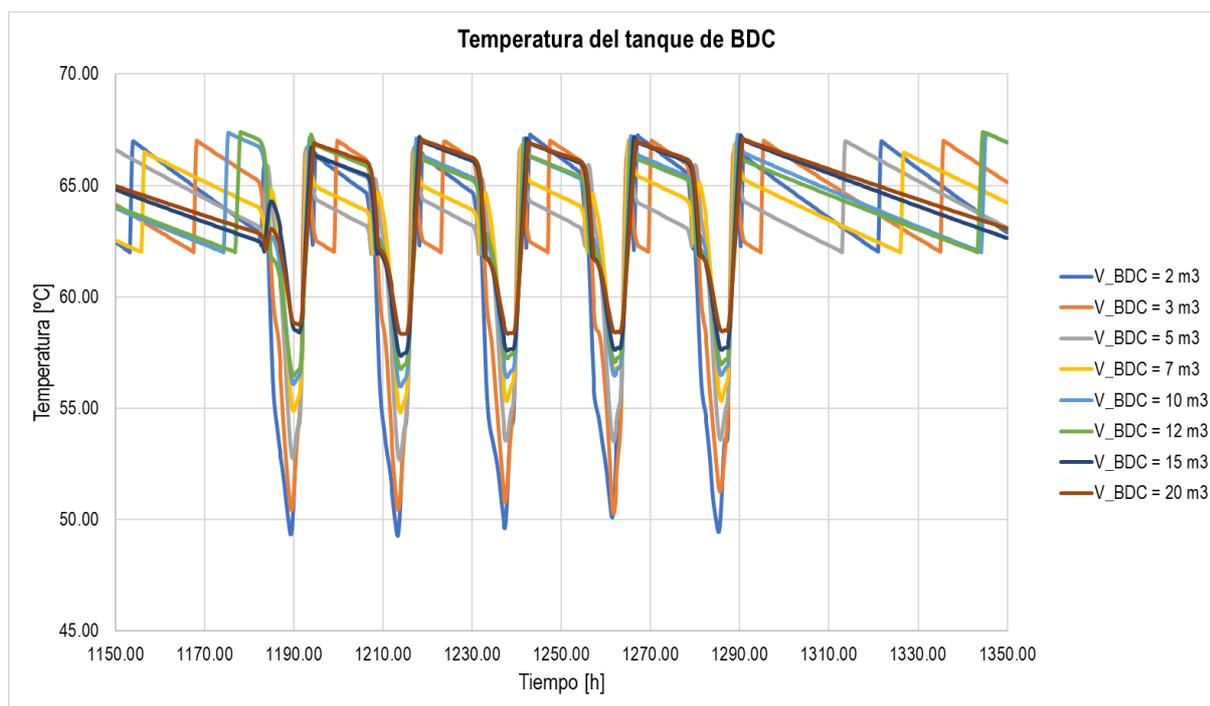


Figura 72. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC variable.

Fuente: Elaboración propia.

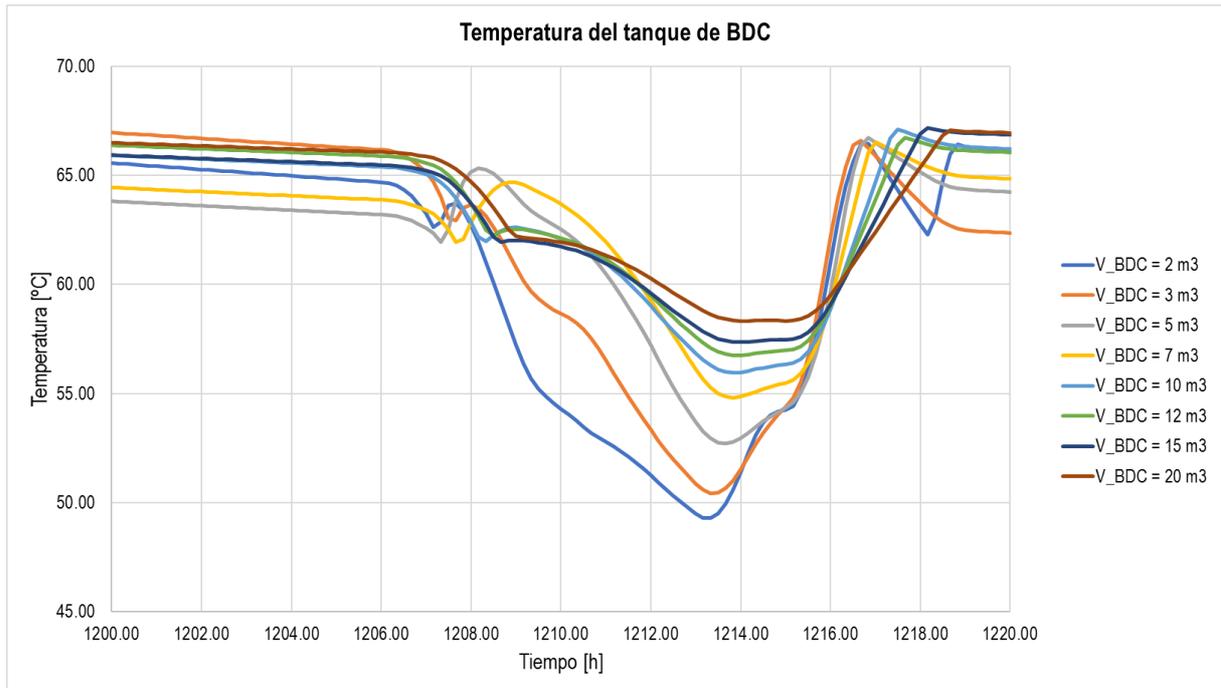


Figura 73. Evolución diaria de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC variable.

Fuente: Elaboración propia.

La temperatura del tanque de la bomba de calor depende directamente del volumen del tanque de la bomba de calor. Así, se observa que a mayor volumen del tanque, la temperatura disminuye a valores menos drásticos que en los casos de menos volumen. Es decir, las oscilaciones de temperatura se ven reducidas, acotándose cada vez más el intervalo de temperatura al que se encuentra.

Para observar mejor este fenómeno, se presentan las gráficas anteriores con el menor y el mayor volumen dentro de las opciones:

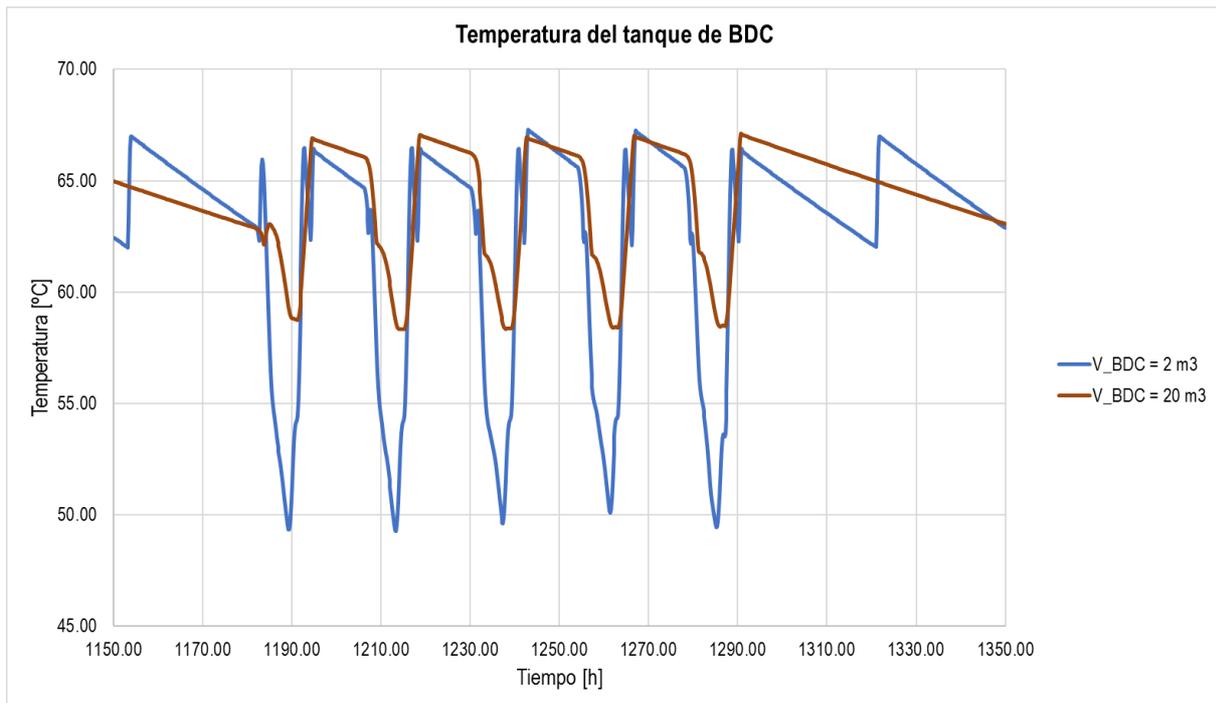


Figura 74. Evolución semanal de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC de 2 m³ y 20 m³. Fuente: Elaboración propia.

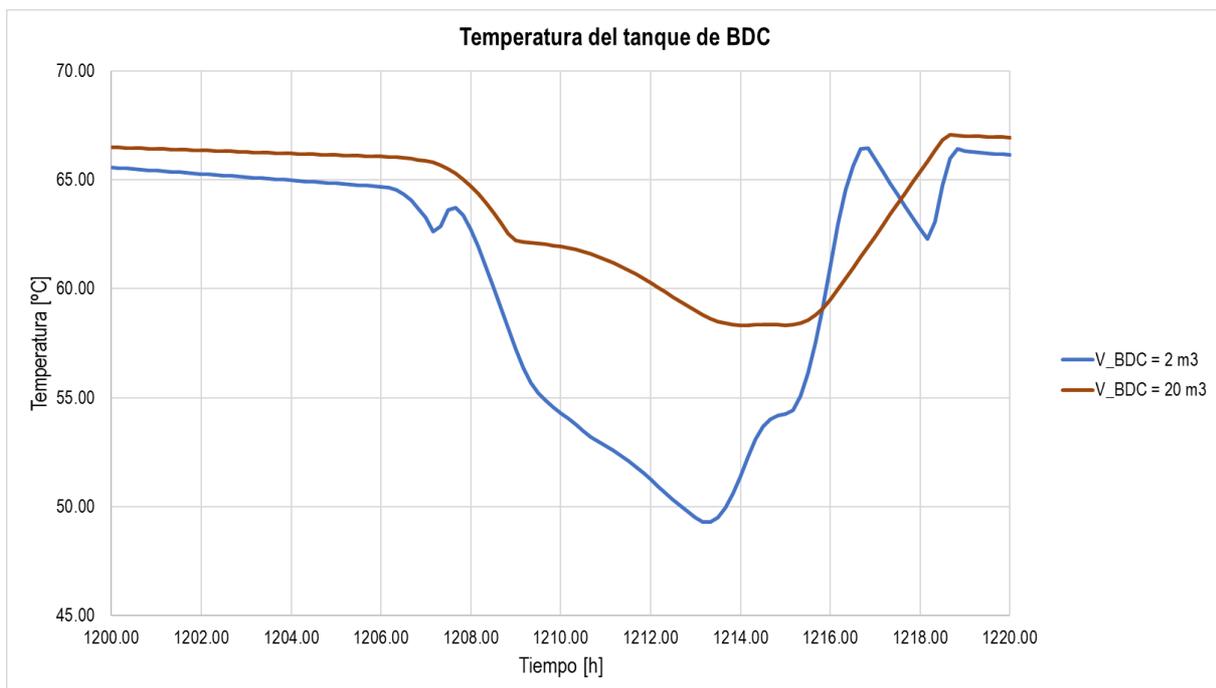


Figura 75. Evolución diaria de la temperatura del tanque de BDC con volumen del tanque de BDC de 2 m³ y 20 m³. Fuente: Elaboración propia.

En estas gráficas se ve cómo al disponer de un volumen de 2 m³, la temperatura disminuye hasta valores entre los 45 °C y los 50 °C a diferencia de la opción de un volumen del tanque de la bomba de calor de 20 m³, donde disminuye hasta valores entre 55 °C y 60 °C. Esto es debido a que al disponer de un volumen pequeño,

en los momentos de consumo de agua caliente sanitaria no hay una cantidad suficiente de agua calentada para poder satisfacer la demanda, provocando disminuciones drásticas.

8.3.1.4 Temperatura de los tanques en función del momento del año

Se va a analizar la temperatura de cada uno de los tanques presentes en la instalación en dos períodos diferentes del año: Febrero y Noviembre. Se han escogido estos dos períodos al no tener sentido evaluarlo en verano debido a que el centro no se encuentra operativo. Para ello, se analiza la evolución semanalmente y diariamente, al igual que en los casos anteriores.

En este caso, al no depender de ninguna de las variables a optimizar de la instalación, se han mantenido constantes. Los volúmenes del tanque de agua caliente sanitaria y del tanque de la bomba de calor se han mantenido en 4 m^3 . Respecto a la bomba de calor, su potencia nominal se fija a 80 kW y su rendimiento nominal a 3.5.

1. Tanque de calefacción

Al analizar la temperatura del tanque de calefacción, se obtiene:

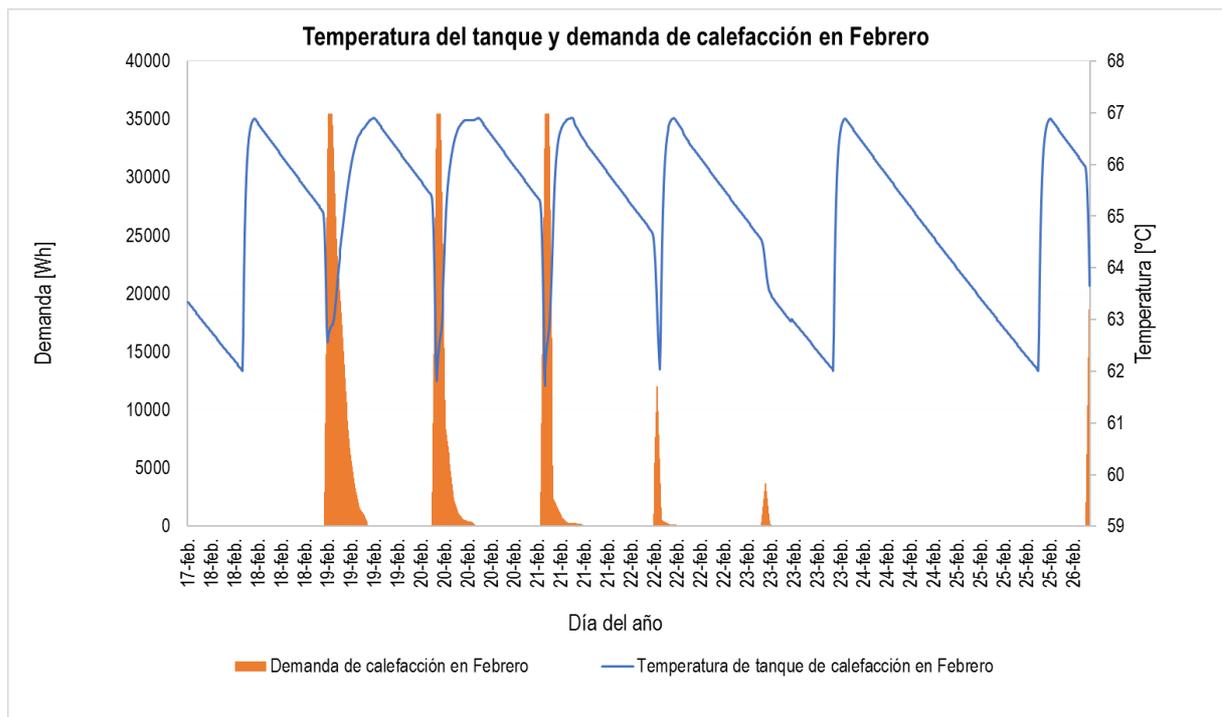


Figura 76. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción en Febrero. Fuente: Elaboración propia.

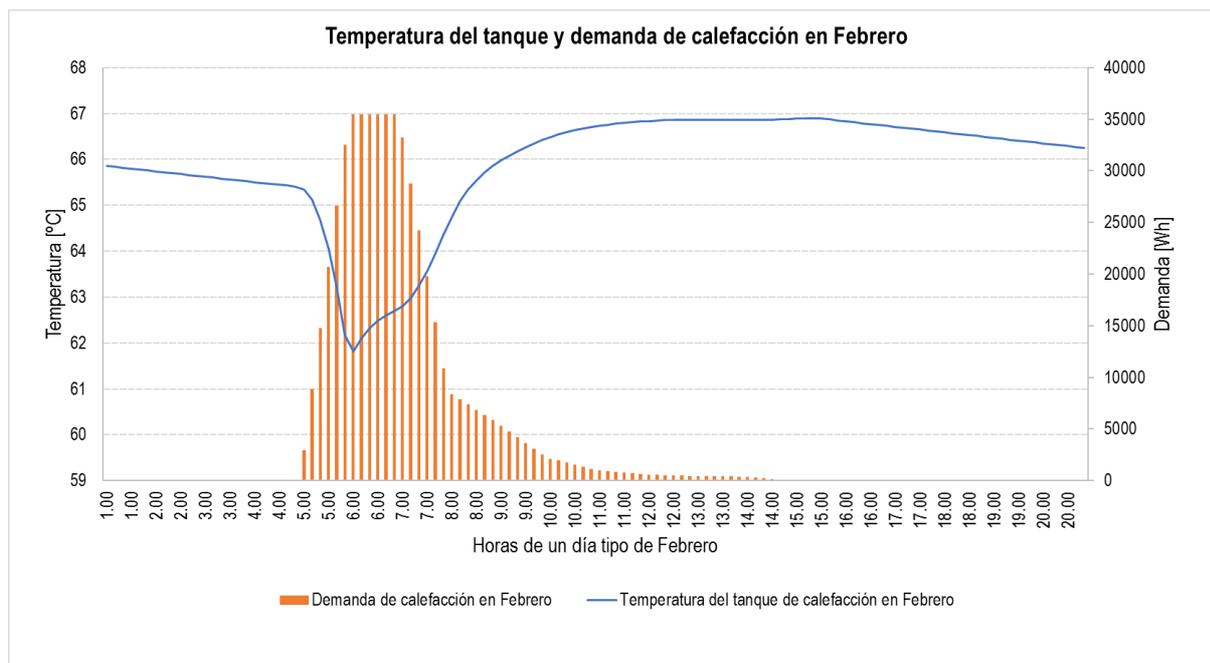


Figura 77. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción en febrero. *Fuente: Elaboración propia.*

Se puede observar que las bajadas más drásticas de temperatura se producen en los momentos en los que aparecen picos de demanda, lo cual concuerda con lo esperado. En los momentos en los que no hay demanda de calefacción vemos cómo la temperatura del tanque desciende de manera constante debido a las pérdidas con el exterior, pero no al consumo de energía por parte de los radiadores.

Analizando el mes de Noviembre, se obtiene:

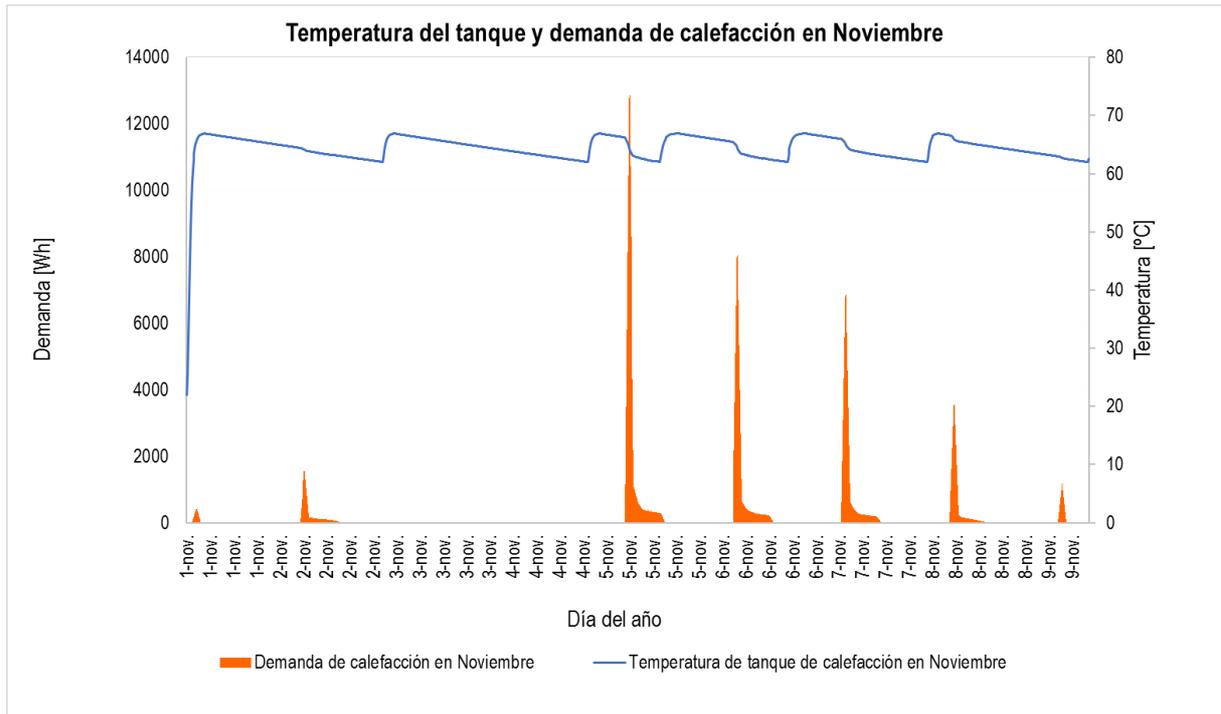


Figura 78. Evolución semanal de la temperatura del tanque de calefacción en Noviembre. Fuente: *Elaboración propia.*

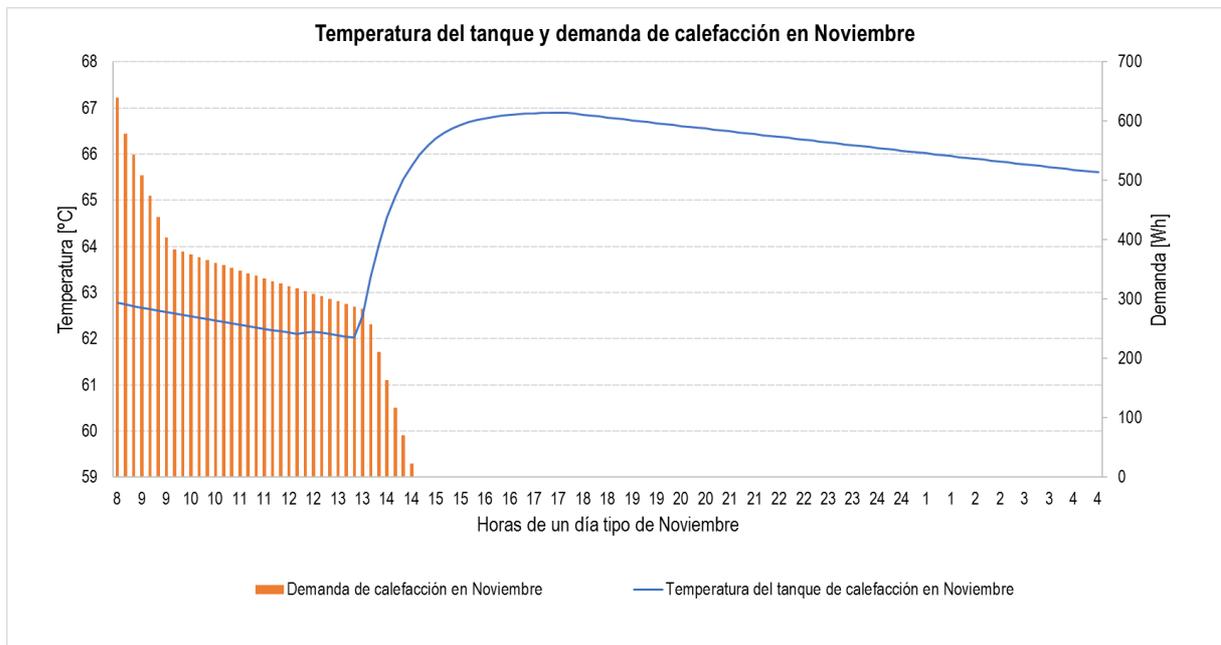


Figura 79. Evolución diaria de la temperatura del tanque de calefacción en Noviembre. Fuente: *Elaboración propia.*

La evolución de las temperaturas en el mes de Noviembre resulta mucho menos significativa que en el mes de Febrero. Se puede observar asimismo las bajadas de temperaturas en los momentos de demanda pero, como cabe esperar, las bajadas son mucho menos acusadas ya que la demanda también es mucho menor.

El interés de analizar las temperaturas en los meses de Febrero y Noviembre reside en las diferentes demandas que se observan en ambos meses, para así poder evaluar las temperaturas en dos períodos distintos y corroborar que ocurre lo esperado.

2. Tanque de agua caliente sanitaria

Al analizar la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria, se obtiene:

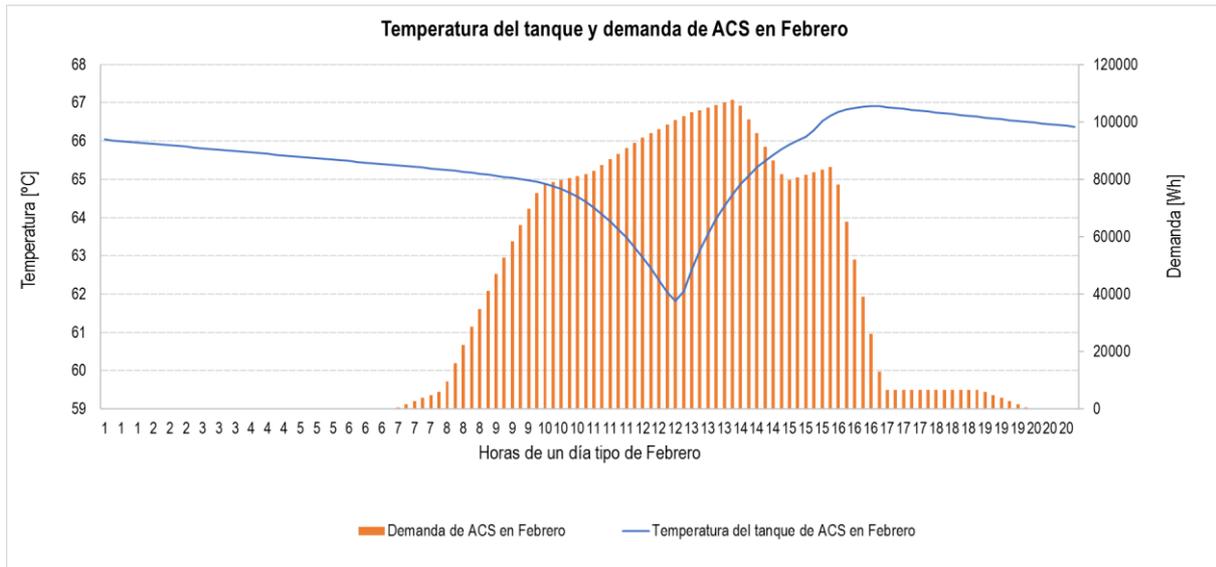


Figura 80. Evolución diaria de la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria en Febrero. *Fuente: Elaboración propia.*

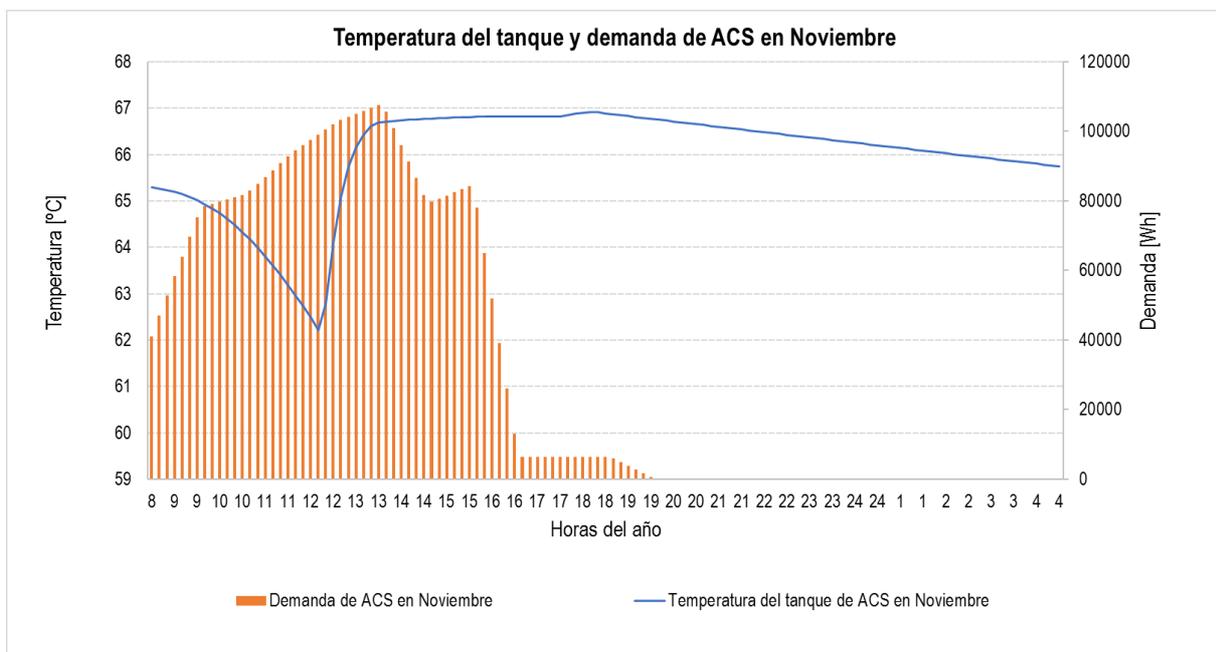


Figura 81. Evolución diaria de la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria en Noviembre. *Fuente: Elaboración propia.*

Al igual que al estudiar la evolución de las temperaturas del tanque de calefacción, se puede observar cómo al aumentar la demanda de agua caliente sanitaria, disminuye la temperatura del tanque de agua caliente sanitaria, aumentando su temperatura cuando la demanda disminuye. De esta manera, se comprueba que el tanque de agua caliente sanitaria funciona según lo esperado.

Para ilustrar la diferencia de la evolución de temperaturas en períodos de funcionamiento del centro con períodos en los que se encuentra cerrado, se presenta a continuación la evolución de temperaturas del tanque de ACS en diferentes períodos del año:

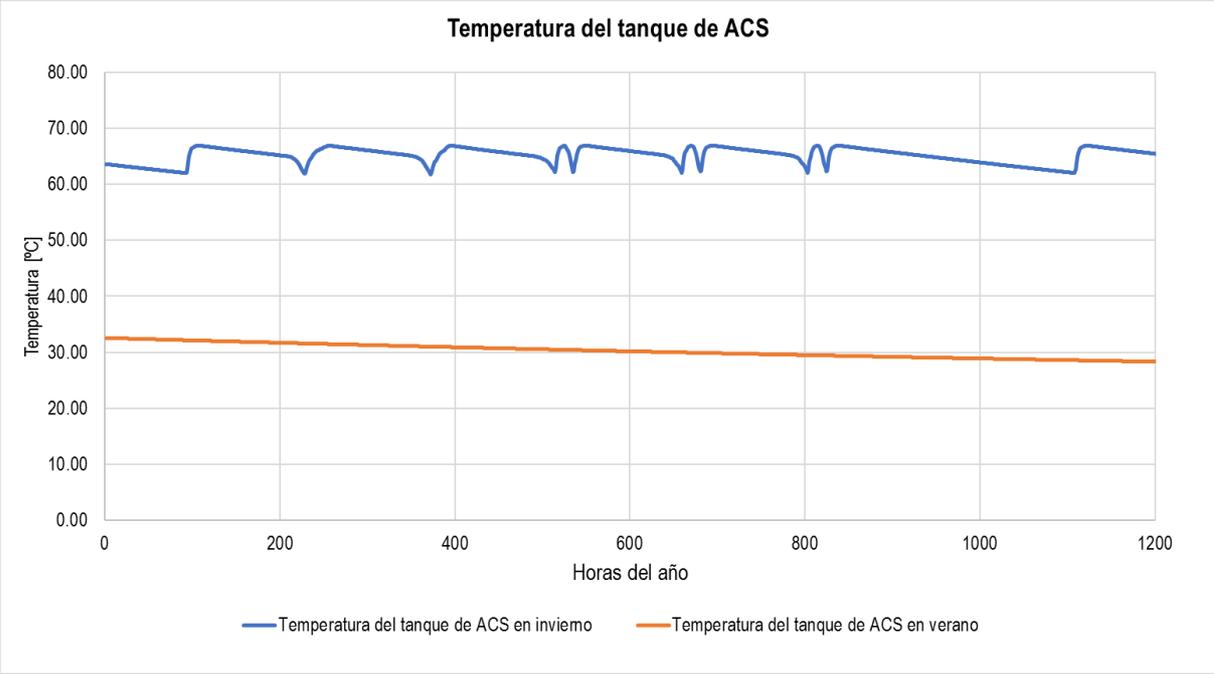


Figura 82. Evolución semanal de las temperaturas del tanque de agua caliente sanitaria en diferentes períodos del año. Fuente: *Elaboración propia.*

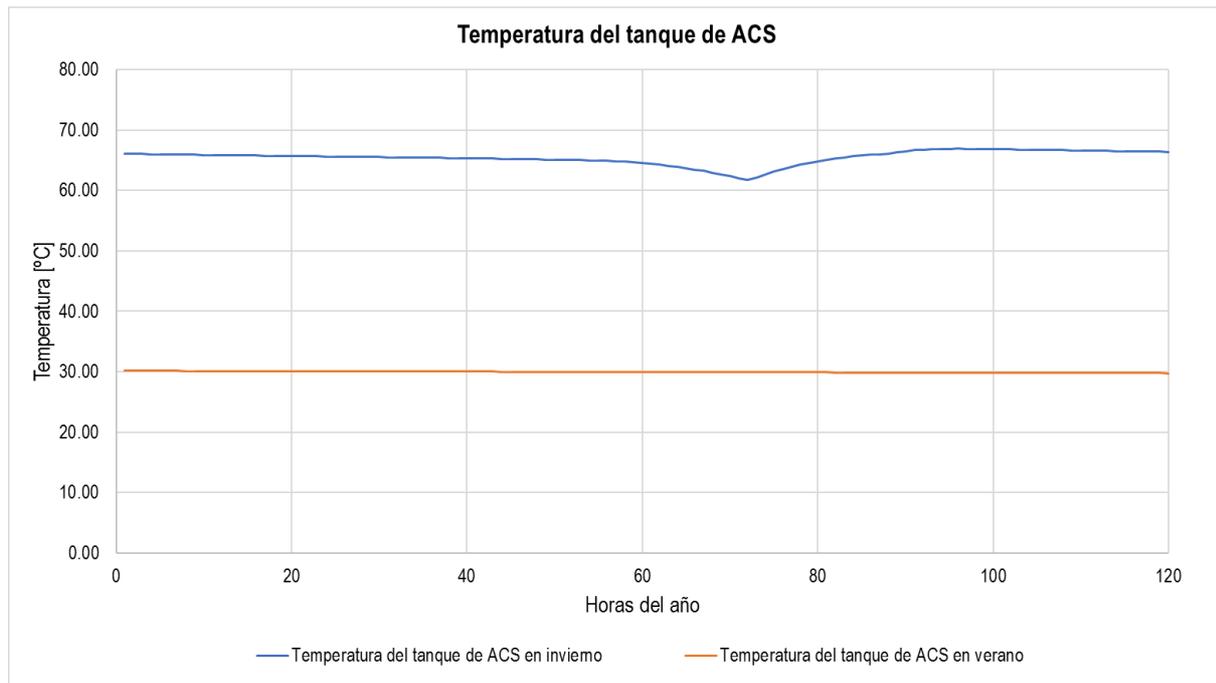


Figura 83. Evolución diaria de las temperaturas del tanque de agua caliente sanitaria en diferentes períodos del año. Fuente: *Elaboración propia*.

Se puede observar la diferencia de temperaturas entre un período de demanda y otro en el que no. En verano, la temperatura es constante alrededor de los 30 °C ya que el funcionamiento se detiene y el tanque adquiere la temperatura ambiente. Sin embargo, en período de demanda, la temperatura del tanque se mantiene entre 60 °C y 70 °C para abastecer la demanda.

3. Tanque de la bomba de calor

Al analizar la temperatura del tanque de la bomba de calor, se obtiene:

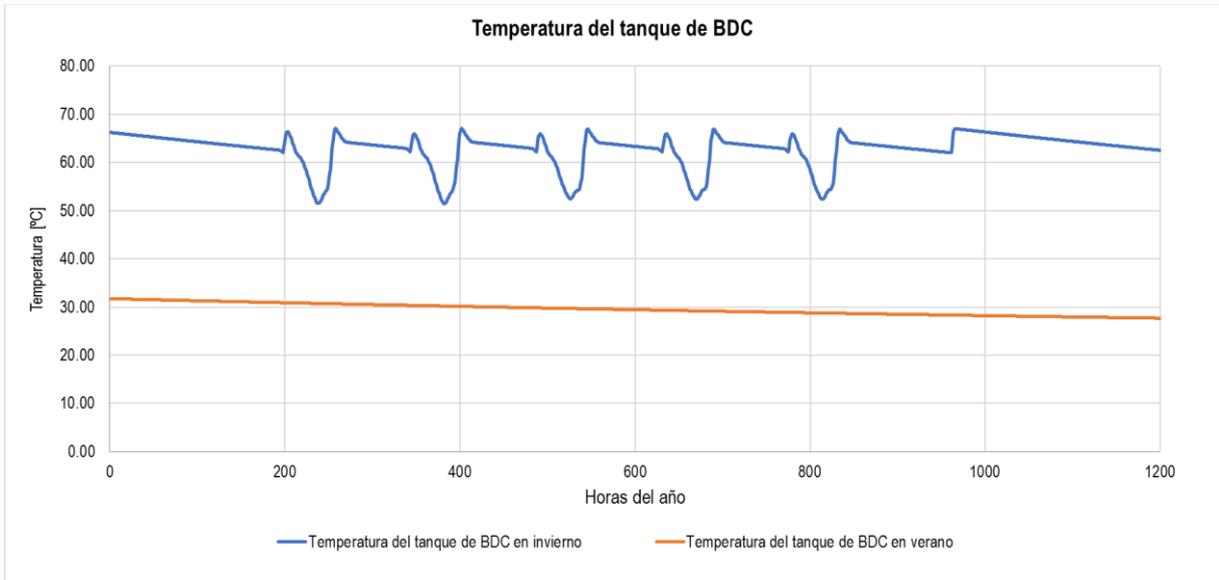


Figura 84. Evolución semanal de las temperaturas del tanque de la bomba de calor en diferentes períodos del año. Fuente: *Elaboración propia*.

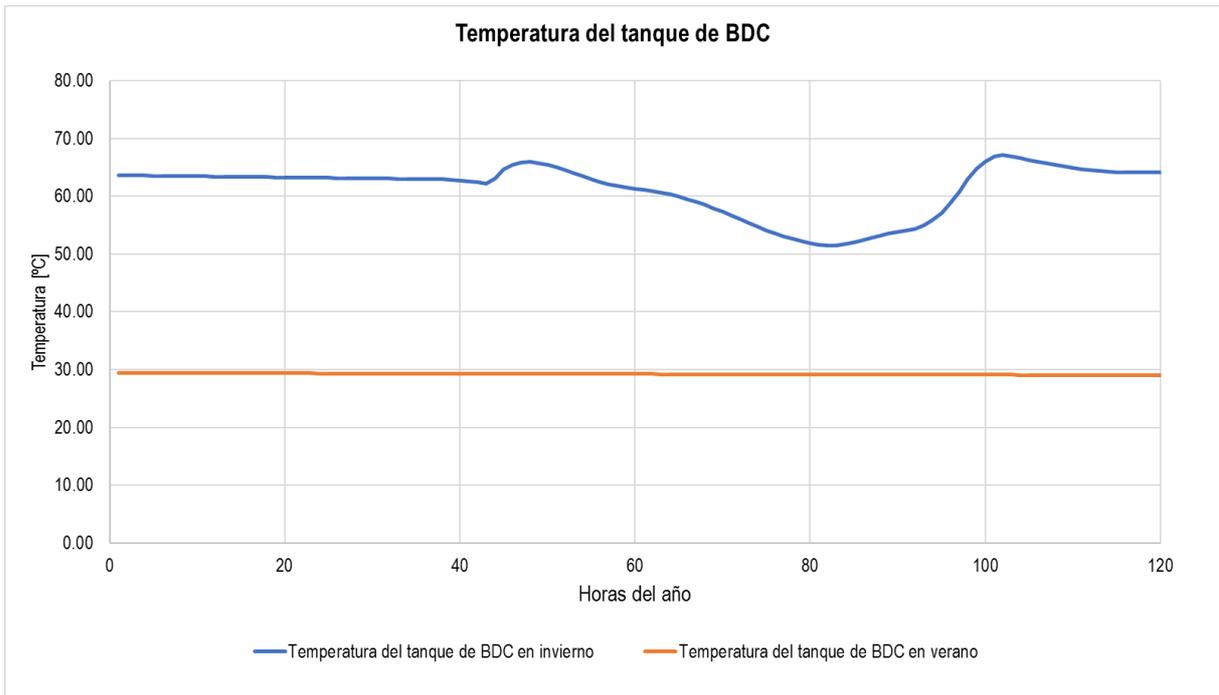


Figura 85. Evolución diaria de las temperaturas del tanque de la bomba de calor en diferentes períodos del año. Fuente: *Elaboración propia*.

Al igual que en la evolución del tanque de agua caliente sanitaria, se puede observar la diferencia de temperaturas entre un período de demanda y otro en el que no. En verano, la temperatura es constante alrededor

de los 30 °C ya que el funcionamiento se para y el tanque adquiere la temperatura ambiente. Sin embargo, en período de demanda, la temperatura del tanque se mantiene entre 60 °C y 70 °C para abastecer la demanda.

8.4 Evaluación de costes

La elección del caso óptimo de la instalación propuesta se lleva a cabo siguiendo el mismo criterio que en el estudio de reducción de demanda. Cada una de las combinaciones se estudia energética y económicamente para así obtener el caso óptimo.

La elección del caso óptimo se hace, al igual que en la optimización de la demanda, en función del Coste de Ciclo de Vida (CCV) y el consumo de energía primaria que resulten de la aplicación de las modificaciones anteriormente descritas. La vida útil se considera de 30 años, siguiendo la siguiente expresión:

$$CCV_{INST} = Sobrecoste + COM \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1 + 0.03)^k}$$

Diferenciando cada uno de los elementos de la instalación, se obtiene:

$$CCV_{INST} = Sobrecoste_{BDC} + COM_{CALD} \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1 + 0.03)^k} + Sobrecoste_{TANQ} + COM_{TANQ} \cdot \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1 + 0.03)^k}$$

Cabe destacar que el coste de mantenimiento de la instalación será un porcentaje sobre el coste de inversión inicial (o sobrecoste) de la misma. Se considera un coste de mantenimiento de un 2.0%.

Se explica a continuación el procedimiento para calcular los costes de cada uno de los equipos de la instalación.

8.4.1 Bomba de calor

8.4.1.1 Costes de Inversión

Para evaluar la inversión inicial de la bomba de calor se asume la validez de la aproximación de los costes de inversión mediante la curva promedio de los costes de inversión de los equipos de marca Mitsubishi con una pequeña modificación que se menciona posteriormente. Así, la inversión inicial en la bomba de calor viene definida por la siguiente gráfica:

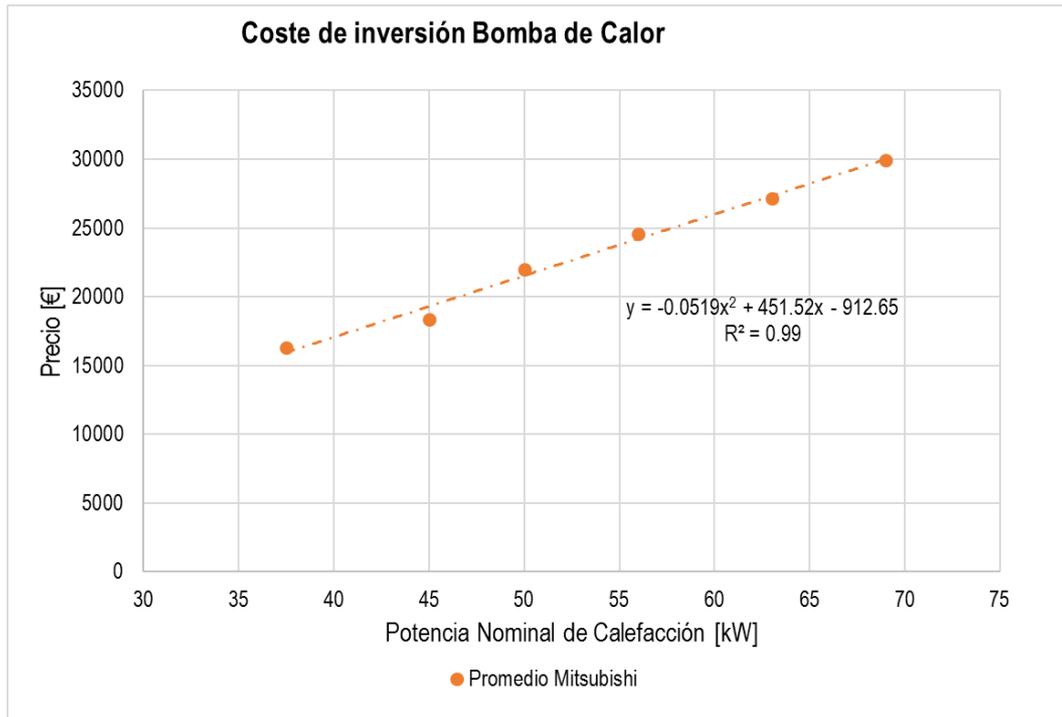


Figura 86. Costes de inversión de la bomba de calor. Fuente: Temario de la asignatura ADE.

Como se puede observar, los costes de inversión de la bomba de calor están principalmente condicionados por la potencia nominal de calefacción que tenga la bomba de calor seleccionada. Sin embargo, no contempla los efectos de la variación del precio según el rendimiento de la misma. Para ello, se realizan modificaciones en la curva que define el coste de inversión de la bomba de calor de forma que se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Coste Inicial}_{BDC} &= (-0.0519 \cdot Pnom_{BDC}^2 + 451.52 \cdot Pnom_{BDC} - 912.65) + \\ &(-0.0519 \cdot Pnom_{BDC}^2 + 451.52 \cdot Pnom_{BDC} - 912.65) \cdot (\eta_{BDC} - \eta_{min}) \cdot 0.3 \end{aligned}$$

Estas modificaciones están basadas en las consultas realizadas a diferentes catálogos de fabricantes. Así, se estima que el coste inicial de la bomba de calor aumenta en un 30% por cada unidad que se produce de aumento de rendimiento.

8.4.1.2 Costes de Operación y Mantenimiento

La bomba de calor opera consumiendo electricidad, por lo que resultan unos costes de operación:

$$CO_{BDC} = Consumo_{BDC} \cdot Precio_{Electr}$$

Los costes de mantenimiento, tal y como se ha citado anteriormente, son proporcionales al coste de inversión de la instalación. Así, resultan:

$$C.Mantenimiento_{BDC} = C.Inicial_{BDC} \cdot 0.02$$

Siendo éstos, de un porcentaje de un 2% aproximadamente sobre la inversión inicial.

8.4.2 Tanques de almacenamiento

8.4.2.1 Costes de Inversión

Para evaluar la inversión inicial de los tanques de almacenamiento se asume la validez de la aproximación de los mismos mediante la curva promedio proporcionada de los costes de inversión de los equipos. Así, la inversión inicial en los tanques de almacenamiento viene definida por la siguiente gráfica:

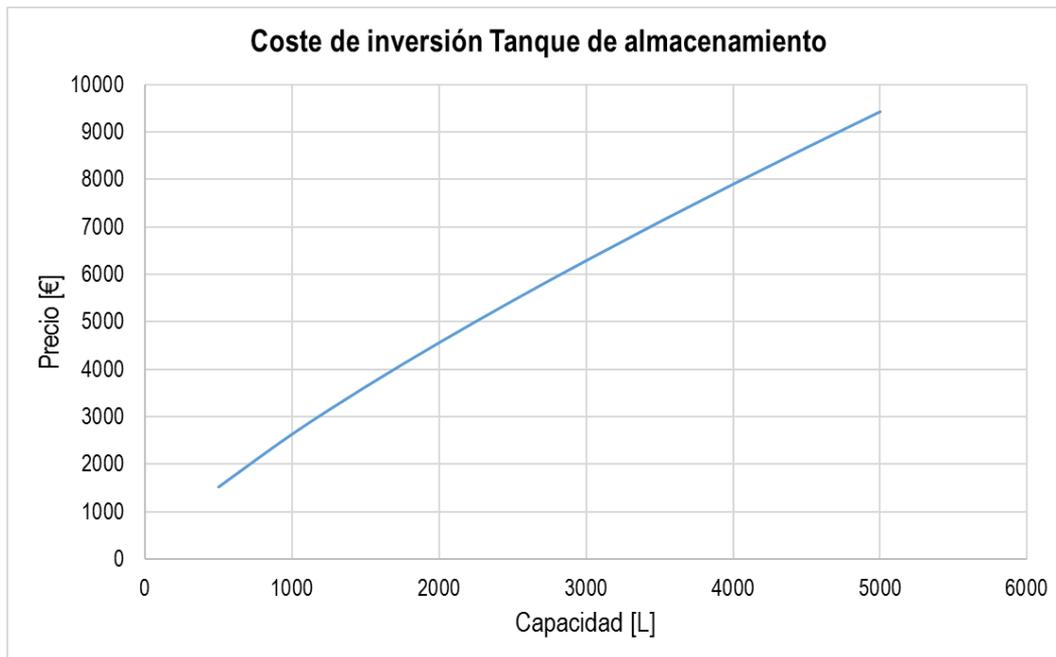


Figura 87. Costes de inversión de los tanques de almacenamiento. Fuente: Temario de la asignatura ADE.

Como se puede observar, los costes de inversión de los tanques de almacenamiento están principalmente condicionados por la capacidad del tanque. La expresión numérica que define los costes de inversión de los tanques de almacenamiento es la siguiente:

$$\text{Coste Inicial}_{TANQ} = 11.112 \cdot V_{TANQ}^{0.7917}$$

Cabe destacar que para las opciones de tanque más pequeños que los existentes, se valorará un coste inicial nulo, contemplando así la opción de mantener el ya existente y abaratar costes.

8.4.2.2 Costes de Operación y Mantenimiento

Los tanques de almacenamiento no generan costes de operación ya que no hay ningún consumo de energía primaria asociado a su funcionamiento. La energía almacenada en dichos tanques en forma de agua caliente es toda proveniente de los equipos generadores de la instalación como son la caldera y la bomba de calor.

Los costes de mantenimiento de los tanques de almacenamiento se calculan de la misma forma que se ha citado anteriormente:

$$C \text{ Mantenimiento}_{TANQ} = C \text{ Inicial}_{TANQ} \cdot 0.02$$

Siendo proporcionales en un porcentaje de un 2% aproximadamente sobre la inversión inicial.

8.5 Elección del caso óptimo

La elección del caso óptimo se estudia mediante la representación de los resultados de CCV gráficamente en función del consumo de energía primaria de cada combinación. El consumo de energía primaria a tener en cuenta para la elección del caso óptimo es el consumo de energía primaria no renovable. Sin embargo, se obtendrá también la gráfica asociada al consumo de energía primaria total para analizar los resultados obtenidos.

8.5.1 Consumo de energía primaria

Los datos de consumo de energía de los que se dispone obtenidos de las simulaciones son los relativos a energía final. Según el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE), se define la energía final como *la energía tal y como se utiliza en los puntos de consumo. Es la que compran los consumidores, en forma de electricidad, carburantes u otros combustibles usados de forma directa*. Asimismo, el concepto de energía primaria es *la energía suministrada al edificio procedente de fuentes renovables y no renovables, que no ha sufrido ningún proceso previo de conversión o transformación. Es la energía contenida en los combustibles y otras fuentes de energía e incluye la energía necesaria para generar la energía final consumida, incluyendo las pérdidas por su transporte hasta el edificio, almacenamiento, etc.* [4]

De modo que, se hace necesario establecer y definir los factores de paso que se necesitan para obtener los valores de consumo de energía primaria a partir de los datos de consumo de energía final procedente de las simulaciones de cada una de las combinaciones.

A la hora de definir la nueva instalación, es importante la correcta consideración de los factores de paso ya que permiten justificar documentalmente las instalaciones alternativas a las propuestas por la normativa vigente.

Por lo tanto, el procedimiento a seguir consiste en definir los factores de paso a utilizar, generar las gráficas para llevar a cabo la toma de decisiones y, una vez seleccionado el caso óptimo, analizar el cumplimiento que establece la normativa de valores límites de consumo.

Factores de paso de Energía Final			
Energético	a Energía Primaria Total (kWhEP/kWhEF)	a Energía Primaria No Renovable (kWhEPNR/kWhEF)	a Emisiones de CO2 (kgCO2/kWhEF)
Electricidad	2.368	1.954	0.331
Gasoleo calefaccion / Fuel-oil	1.182	1.179	0.311
GLP	1.204	1.201	0.254
Gas Natural	1.195	1.190	0.252
Carbon	1.084	1.082	0.472
Biomasa no densificada	1.037	0.034	0.018
Biomasa densificada (pelets)	1.113	0.085	0.018

Figura 88. Factores de paso a energía primaria. *Fuente: HULC.*

8.5.2 Generación de resultados

Una vez definida la metodología de cálculo, se procede a la elaboración de las gráficas para llevar a cabo la toma de decisiones.

En ellas se han plasmado los resultados obtenidos en la simulación de las combinaciones que han salido a partir de las distintas propuestas. Para el cálculo del consumo de energía primaria se han tenido en cuenta todos los servicios ofrecidos por el centro que sean consumidores de energía como son calefacción, refrigeración, iluminación y agua caliente sanitaria.

$$C_{EP} = C_{EP}^{CAL} + C_{EP}^{REF} + C_{EP}^{ILLU} + C_{EP}^{ACS}$$

Para el cálculo se han estimado los siguientes valores:

- ✓ Rendimiento del equipo de refrigeración de 2.
- ✓ Rendimiento de los equipos de iluminación de 1.

Así, se obtiene:

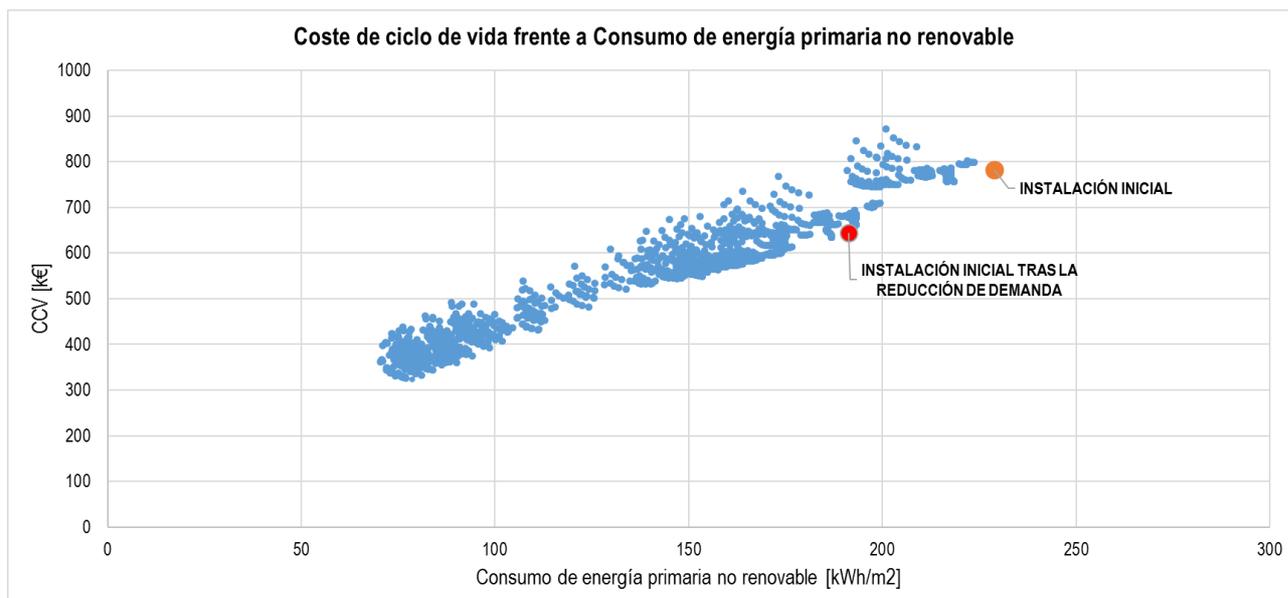


Figura 89. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable. *Fuente: Elaboración propia.*

3

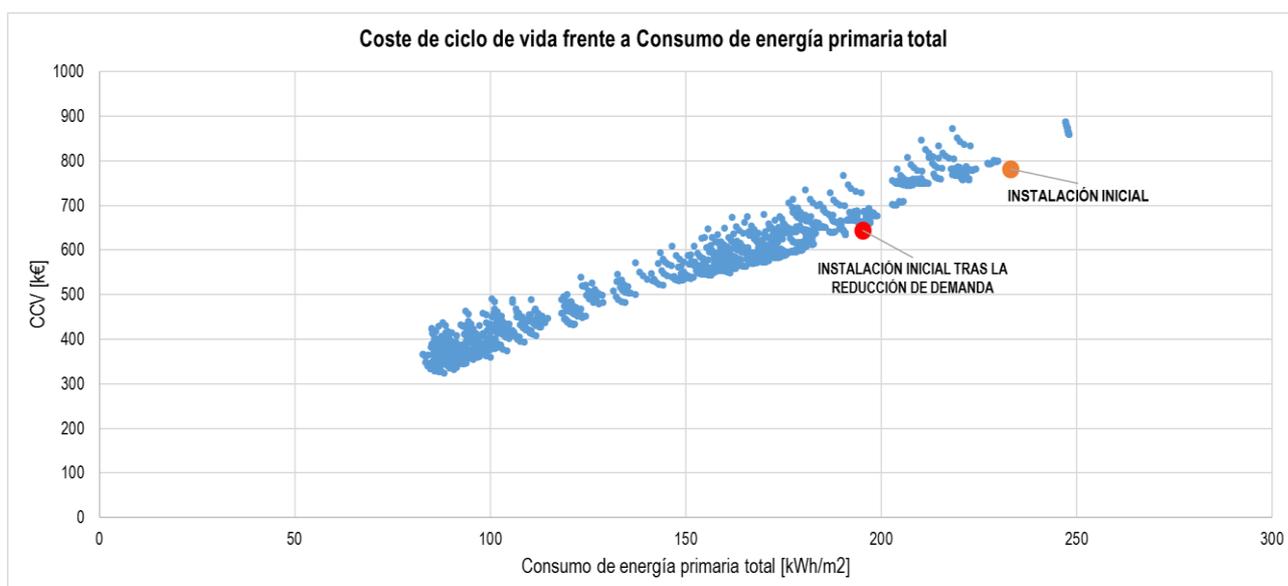


Figura 90. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria total. *Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede observar, se destaca en ambas gráficas en color naranja la situación del edificio inicialmente, antes de la reducción de la demanda. De la misma manera, se destaca en color rojo la situación del edificio tras la reducción de la demanda.

Se puede observar una vez más la mejora llevada a cabo al realizar el estudio de reducción de demanda, viéndose reducidos tanto el consumo de energía primaria como los costes de ciclo de vida.

En el estudio actual, cabe destacar el amplio margen de mejora que se ha abierto al llevar a cabo la propuesta de una nueva instalación. De esta manera, aparecen alternativas con una reducción del consumo mayor del 50% que en el caso inicial, ya que se parte de valores de consumo entre 350 y 400 kWh/m² y se alcanzan valores hasta entre 100 y 150 kWh/m².

Previo a la toma de decisiones, se da paso al análisis de la curva, identificando las consecuencias que producen las diferentes alternativas de las variables a optimizar. Se recuerda que las variables son:

- Rendimiento nominal de la bomba de calor.
- Potencia nominal de la bomba de calor.
- Volumen del tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria.
- Volumen del tanque de almacenamiento de la bomba de calor.

8.5.2.1 Influencia del rendimiento de la bomba de calor

Puesto que la toma de decisiones se hará en base al consumo de energía primaria no renovable, se van a analizar la influencia de los diferentes parámetros tomando como base la *Figura 89: Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable*.

Representando la misma curva que anteriormente identificando cada uno de los valores posibles de rendimiento nominal de la bomba de calor, se obtiene:

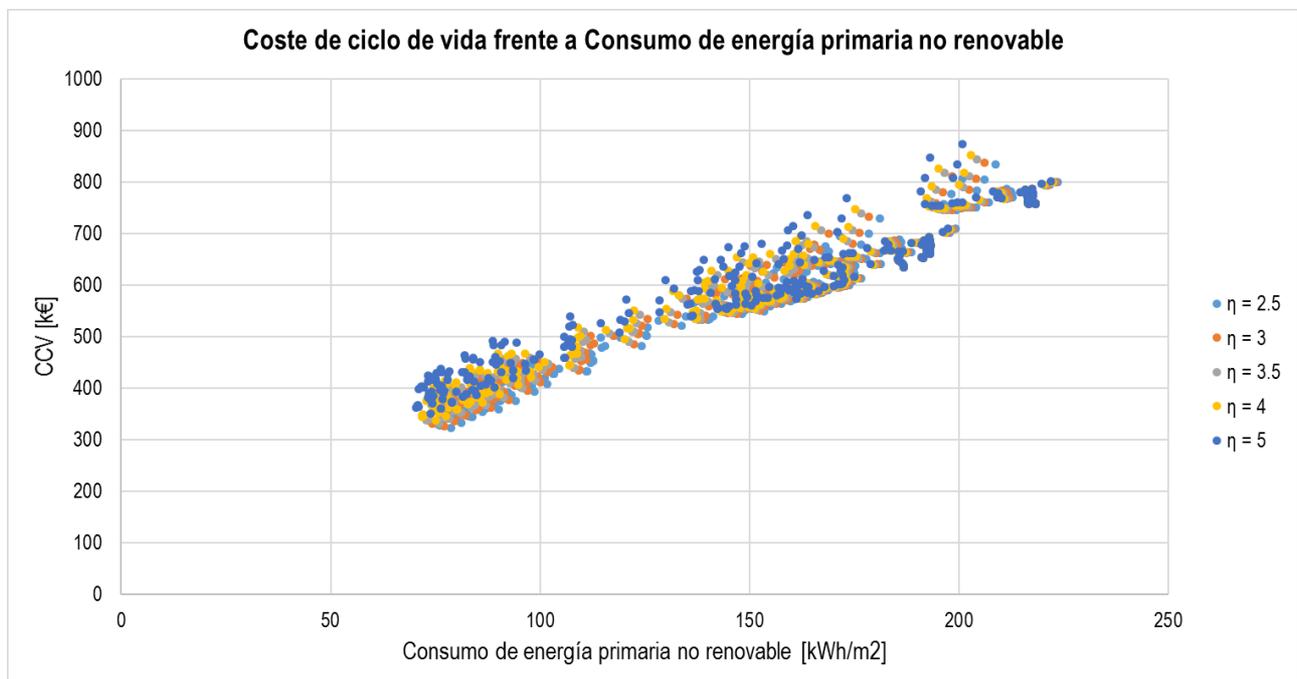


Figura 91. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función del rendimiento de la bomba de calor. *Fuente: Elaboración propia.*

A partir de la gráfica obtenida, se puede observar que en este caso la variable rendimiento no da lugar a la zona de menor consumo, si bien es cierto que al aumentar el rendimiento hace que aparezcan combinaciones donde el consumo disminuye, como cabría esperar. Sin embargo, la tendencia que se observa en la ilustración nos muestra que a pesar de que el rendimiento es un factor decisivo cuando se habla de consumo, en este caso no es determinante ya que no resulta predominante un solo valor de rendimiento en la zona de menor consumo de la instalación.

8.5.2.2 Influencia de la potencia de la bomba de calor

Representando la misma curva anterior e identificando cada uno de los valores posibles de potencia nominal de la bomba de calor, se obtiene:

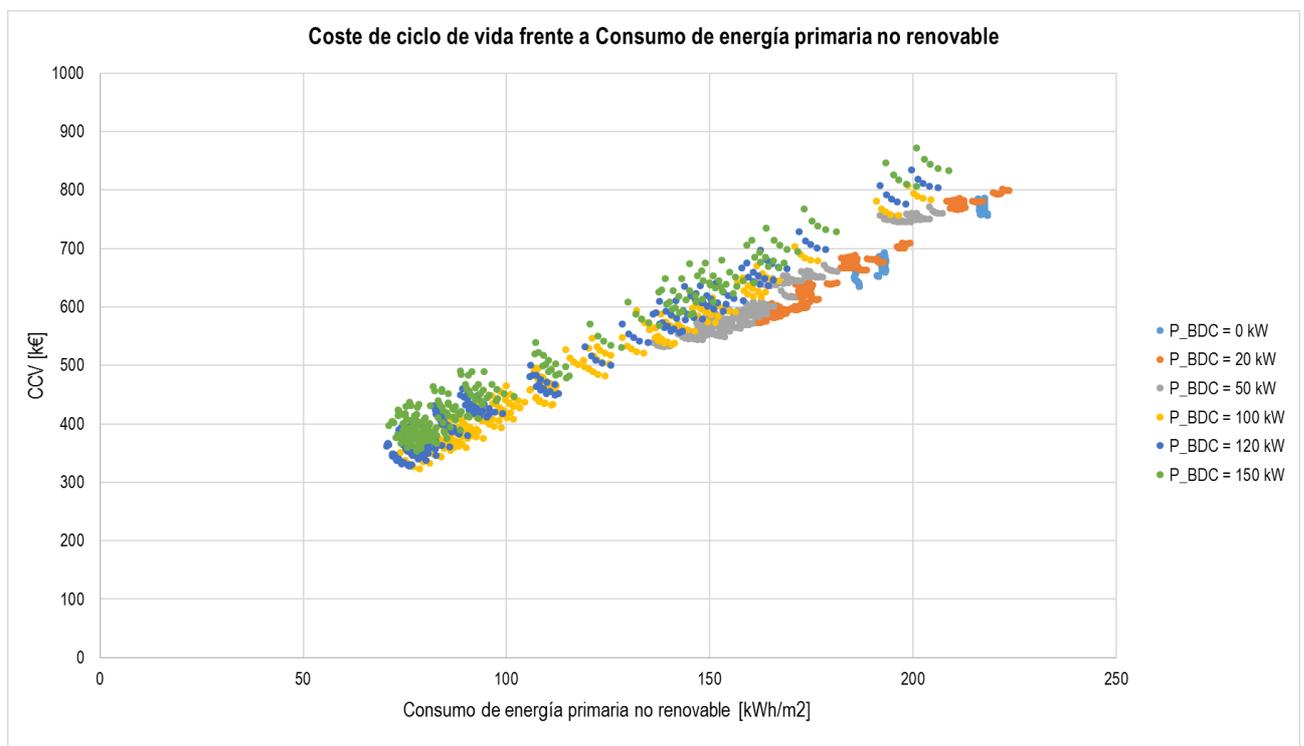


Figura 92. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función de la potencia de la bomba de calor. Fuente: *Elaboración propia*.

A partir de la gráfica obtenida, se puede observar en este caso que la potencia de la bomba de calor ofrece combinaciones alrededor del punto óptimo (el extremo inferior) conforme la potencia es mayor. A diferencia del rendimiento, se podría decir que la potencia de la bomba de calor sí podría catalogarse como una variable decisiva a la hora de seleccionar el óptimo. De hecho, la principal diferencia de la instalación propuesta con la instalación existente es la incorporación de la bomba de calor, y el parámetro decisivo para su diseño, es su potencia nominal. Por lo tanto, se podría determinar que probablemente la potencia de la bomba de calor que dé lugar a la combinación óptima será de 100 kW o 120 kW.

8.5.2.3 Influencia del volumen del tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria

Representando la misma curva que anteriormente identificando cada uno de los valores posibles de volumen del tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria, se obtiene:

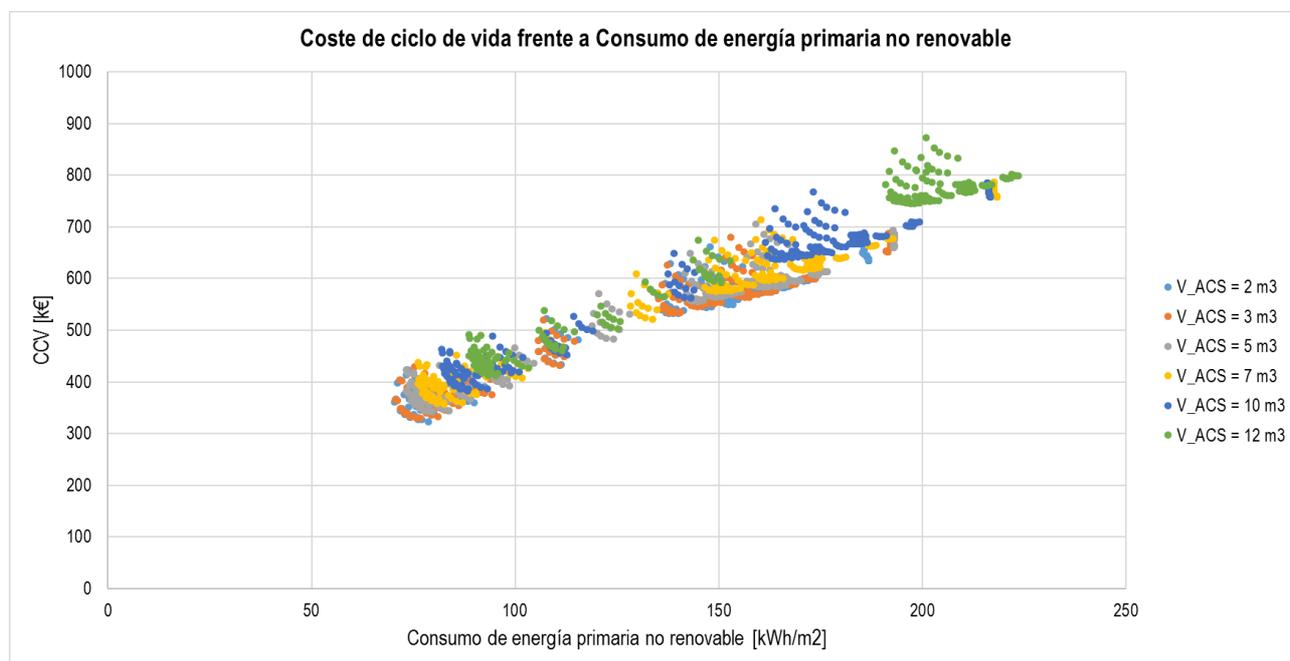


Figura 93. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función del volumen del tanque de almacenamiento de agua caliente sanitaria. *Fuente: Elaboración propia.*

A partir de la gráfica obtenida, se puede observar que a mayor volumen del tanque de ACS, mayor es el consumo de energía primaria y el CCV. Esto puede deberse a que al ser mayor el volumen del tanque, el agua sufre descensos de temperatura menos drásticos que a volúmenes menores, como se vió en el apartado 8.3.1.2: *Temperatura de los tanques en función del rango de volúmenes del tanque de agua caliente sanitaria*, y por lo tanto el agua vuelve a los equipos generadores a mayor temperatura que en un volumen más pequeño. Al ser más pequeña la subida de temperatura que tienen que aportar los equipos generadores, se produce un funcionamiento de los equipos a carga parcial lo cual provoca un aumento del consumo de los equipos. Un funcionamiento óptimo de la instalación para volúmenes del tanque de ACS mayores, supondría una potencia nominal más baja para evitar el funcionamiento a carga parcial. Asimismo, en ese caso también resultaría interesante optimizar el control de la instalación para no penalizar el rendimiento de los equipos, es decir, evitando el funcionamiento cuando el factor de carga parcial sea muy bajo.

8.5.2.4 Influencia del volumen del tanque de almacenamiento de la bomba de calor

Representando la misma curva anterior e identificando cada uno de los valores posibles de volumen del tanque de almacenamiento de la bomba de calor, se obtiene:

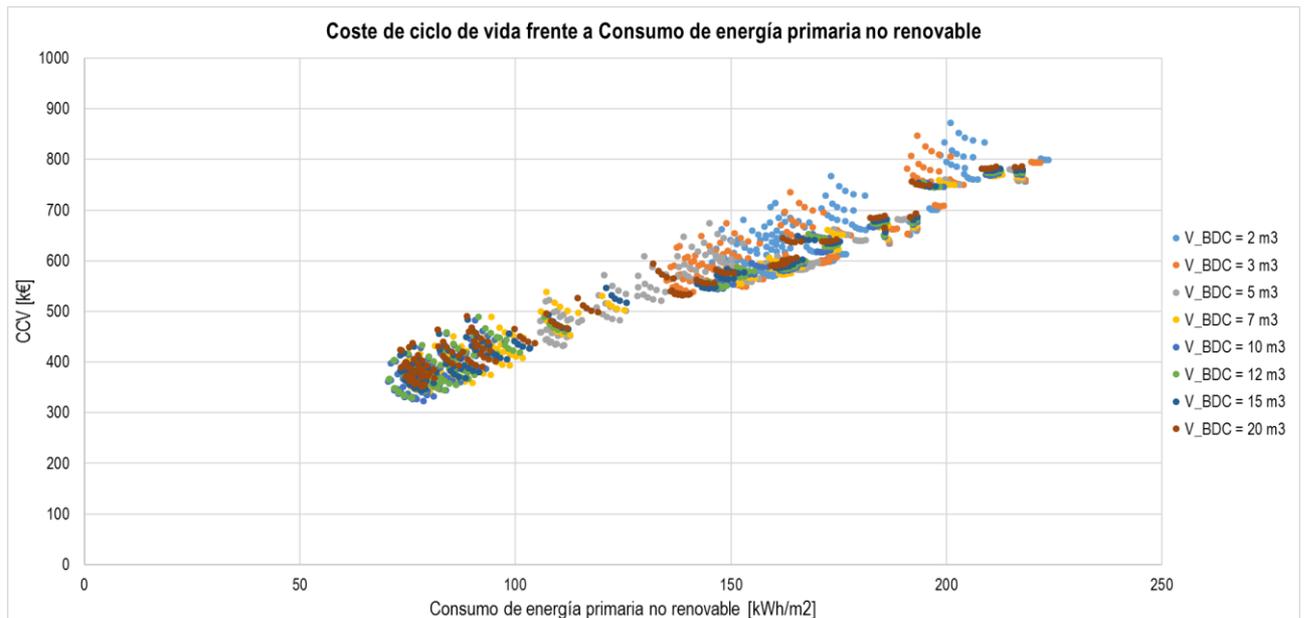


Figura 94. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en función del volumen del tanque de almacenamiento de la bomba de calor. *Fuente: Elaboración propia.*

A partir de la gráfica obtenida, se puede observar que los mayores volúmenes del tanque de la bomba de calor conllevan un menor consumo y un menor CCV. Esto es así debido a que un mayor volumen equivale a una mayor cantidad de agua calentada por la bomba de calor, lo cual lleva consigo una reducción del funcionamiento de los equipos generadores para satisfacer la demanda de ACS (si se recuerda, la bomba de calor sólo suministraba agua caliente para duchas, no para los radiadores). Así, al disminuir los períodos de funcionamiento de los equipos generadores, hace que el consumo y por tanto los costes de operación se vean disminuidos.

8.5.3 Zona de óptimos

La zona donde se encuentran los casos óptimos se define, en primer lugar, seleccionando la combinación que presenta un CCV menor. Fijado los valores de CCV y de consumo de energía primaria, se acota la zona de óptimos, donde las combinaciones incluidas cumplirán las siguientes condiciones:

- CCV como máximo un 5% superior al mínimo establecido
- Consumo de energía primaria como máximo un 20% diferente al valor mínimo establecido

De esta manera, resultan un total de 17 combinaciones dentro de la zona de óptimos, lo que resulta un 2.7% del total. Las características principales de la zona de óptimos son:

- ✓ Potencia nominal de la bomba de calor 100 kW o 120 kW
- ✓ Rendimiento nominal de la bomba de calor 2.5, 3, 3.5 o 5.

- ✓ Volumen del tanque de agua caliente sanitaria 3 m³ o 5 m³.
- ✓ Volumen del tanque de la bomba de calor 7 m³, 10 m³ o 12 m³.

Si se analiza porcentualmente los valores de la zona de óptimos para cada variable, se obtiene:

Potencia de la BDC		Rendimiento de la BDC		Volumen de ACS		Volumen de BDC	
20 kW	0 %	2.5	35 %	2 m ³	0 %	2 m ³	0 %
50 kW	12%	3	18 %	3 m³	59 %	3 m ³	0 %
100 kW	53 %	3.5	6 %	5 m³	41 %	5 m ³	0 %
120 kW	35 %	4	0 %	7 m ³	0 %	7 m ³	6 %
150 kW	0 %	5	41 %	10 m ³	0 %	10 m³	71 %
				12 m ³	0 %	12 m³	24 %
						15 m ³	0 %
						20 m ³	0 %

Tabla 22. Distribución de las características de la zona de óptimos. *Fuente: Elaboración propia.*

Observando los resultados obtenidos y según los porcentajes, se puede ver que en líneas generales, los casos más convenientes presentan una alta potencia nominal de la bomba de calor, un rendimiento mayor y volúmenes de los tanques con valores pequeños en el caso del tanque de ACS y volúmenes mayores en el caso del tanque de la bomba de calor. Esto resulta coherente con lo explicado hasta ahora, ya que se ha visto en el análisis anterior de los resultados que una mayor potencia de la bomba de calor conllevaba un menor consumo de la caldera y por tanto un menor consumo de la instalación en general, por ser la bomba de calor el elemento generador más eficiente. Asimismo, un volumen del tanque de ACS menor, provoca un menor consumo de la caldera ya que la cantidad de agua a calentar es menor y puede ser cubierta por la bomba de calor. Y, como es lógico, el volumen del tanque de la bomba de calor presenta un valor relativamente alto ya que éste hace que la bomba de calor pueda suplir la demanda durante más tiempo al disponer de más agua calentada para ello, provocando así una menor dependencia de la caldera.

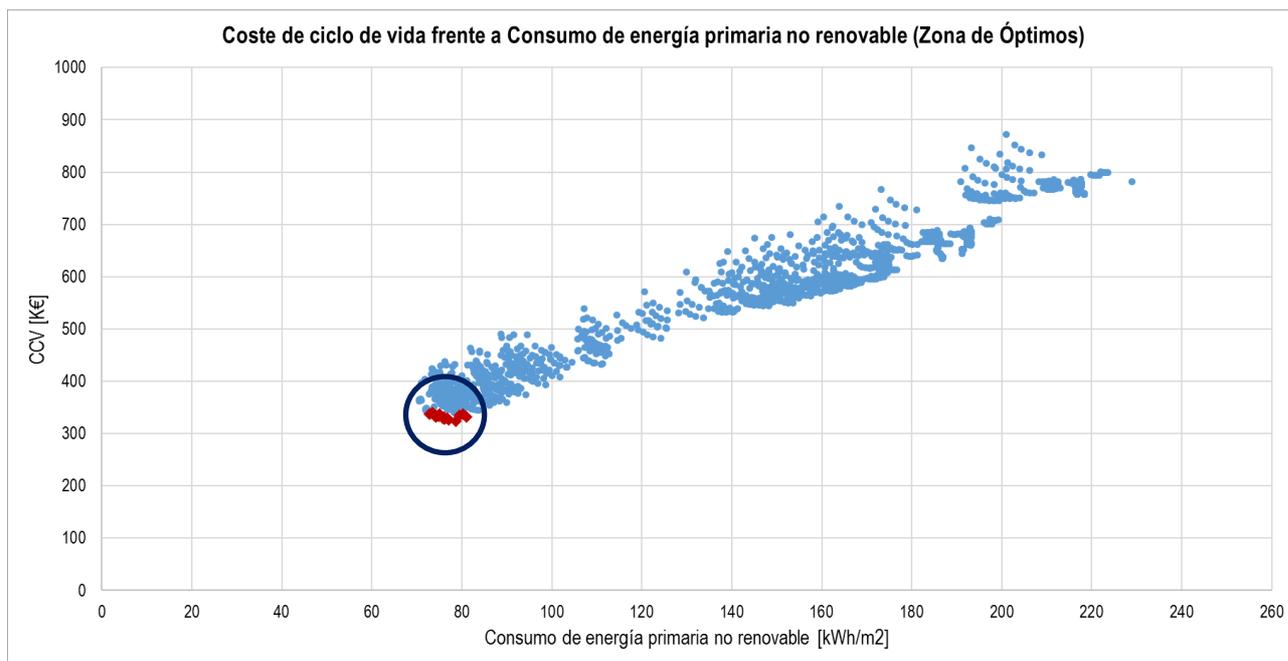


Figura 95. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en la zona de óptimos.

Fuente: Elaboración propia.

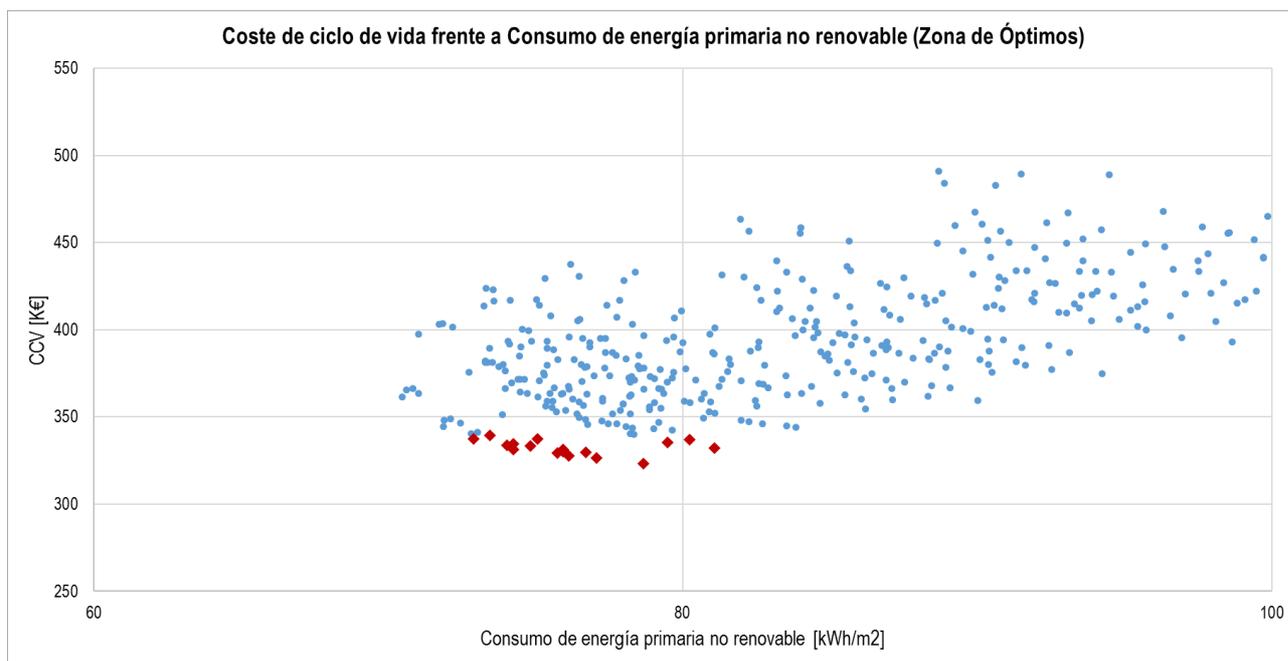


Figura 96. Coste de Ciclo de Vida frente a consumo de energía primaria no renovable en la zona de óptimos ampliado. *Fuente: Elaboración propia.*

En la gráfica representada se puede observar en color rojo la situación en la que se encuentran las 17 combinaciones pertenecientes a la zona de óptimos.

9 INSTALACIÓN ÓPTIMA

Una vez analizados los resultados obtenidos de las combinaciones y habiendo definido la zona donde se encontrará la combinación seleccionada, se procede a elegir la alternativa que definirá la instalación propuesta y, con ello, la situación final del edificio.

9.1 Valores límites según la normativa

La definición de la instalación además de resultar la combinación de menor coste, también ha de cumplir una serie de requerimientos establecidos en el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). En el mismo se establece un límite para el consumo de energía primaria según el nivel de carga interna del edificio:

Tabla 3.1.b - HE0
Valor límite $C_{ep,nren,lim}$ [kw·h/m²·año] para uso distinto del residencial privado

Nivel de carga interna CFI [W/m ²]	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Baja, CFI < 6	100	85	80	65	50	40
Media, $6 \leq CFI < 9$	135	120	110	100	85	75
Alta y muy alta, $9 \leq CFI$	160	145	135	125	110	100
En territorio extrapeninsular se multiplicarán los valores de la tabla por 1,40						

Figura 97. Límites en el consumo de energía primaria no renovable. Fuente: Documento Básico de Ahorro de Energía.

Tabla 3.2.b - HE0
Valor límite $C_{ep,tot,lim}$ [kw·h/m²·año] para uso distinto del residencial privado

Nivel de carga interna CFI [W/m ²]	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Baja, CFI ≤ 6	200	190	185	175	165	155
Media, $6 \leq CFI < 9$	230	220	215	205	195	185
Alta y muy alta, CFI ≥ 9	265	250	245	235	225	215
En territorio extrapeninsular se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25						

Figura 98. Límites en el consumo de energía primaria total. Fuente: Documento Básico de Ahorro de Energía.

Como se comentaba al inicio del estudio, el edificio se encuentra en Sevilla, lo cual corresponde a la zona climática B4. Asimismo, la carga debida a fuentes internas resulta de 6.44 W/m². Según esta definición, la combinación seleccionada ha de cumplir la limitación respecto al consumo de energía primaria no renovable de 110 kWh/m²·año y respecto al consumo de energía primaria total de 215 kWh/m²·año.

Para visualizar la equivalencia de la limitación con respecto a las combinaciones generadas, se expone el cálculo de los valores correspondientes al consumo constante de iluminación y refrigeración e ilustrar nuevamente el catálogo resultante.

El cálculo de consumo de energía primaria asociado a refrigeración se calcula suponiendo un equipo similar al que llevaría el edificio de referencia que cubra la demanda del edificio tras la reducción de demanda. Esto es, cubriendo una demanda anual de 5.18 kWh/m² y con un EER igual a 2.

$$C.Ep = C.Ep_{CALEF} + C.Ep_{REFRI} + C.Ep_{ILUM} + C.Ep_{ACS}$$

De esta manera se obtiene:

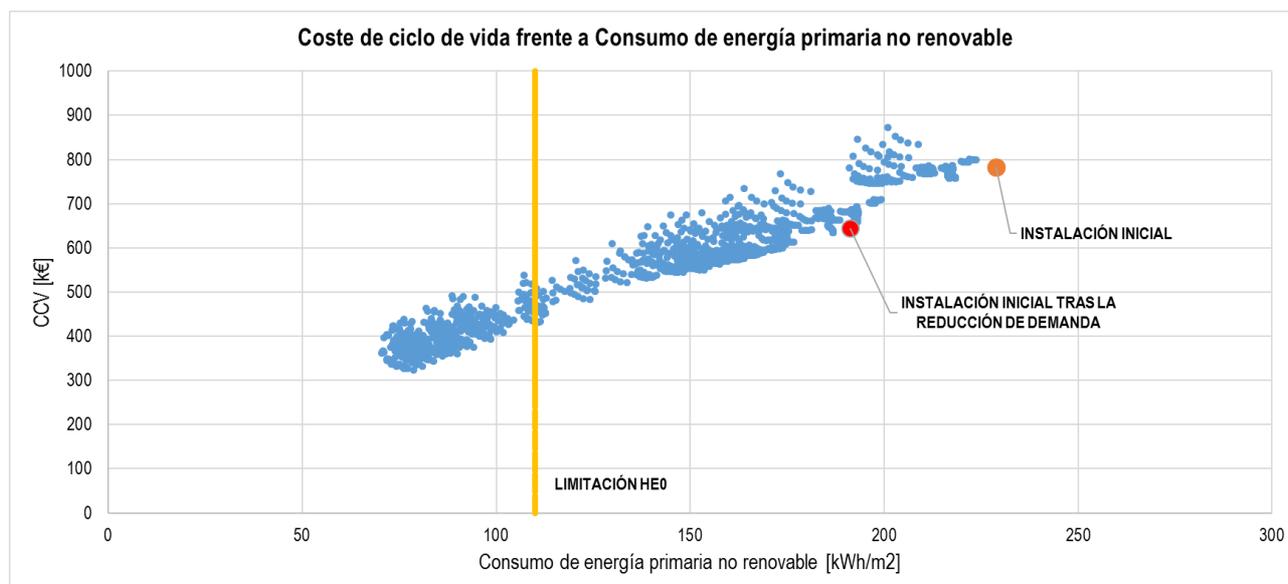


Figura 99. Limitación de la normativa en consumo de energía primaria no renovable. Fuente: Elaboración propia.

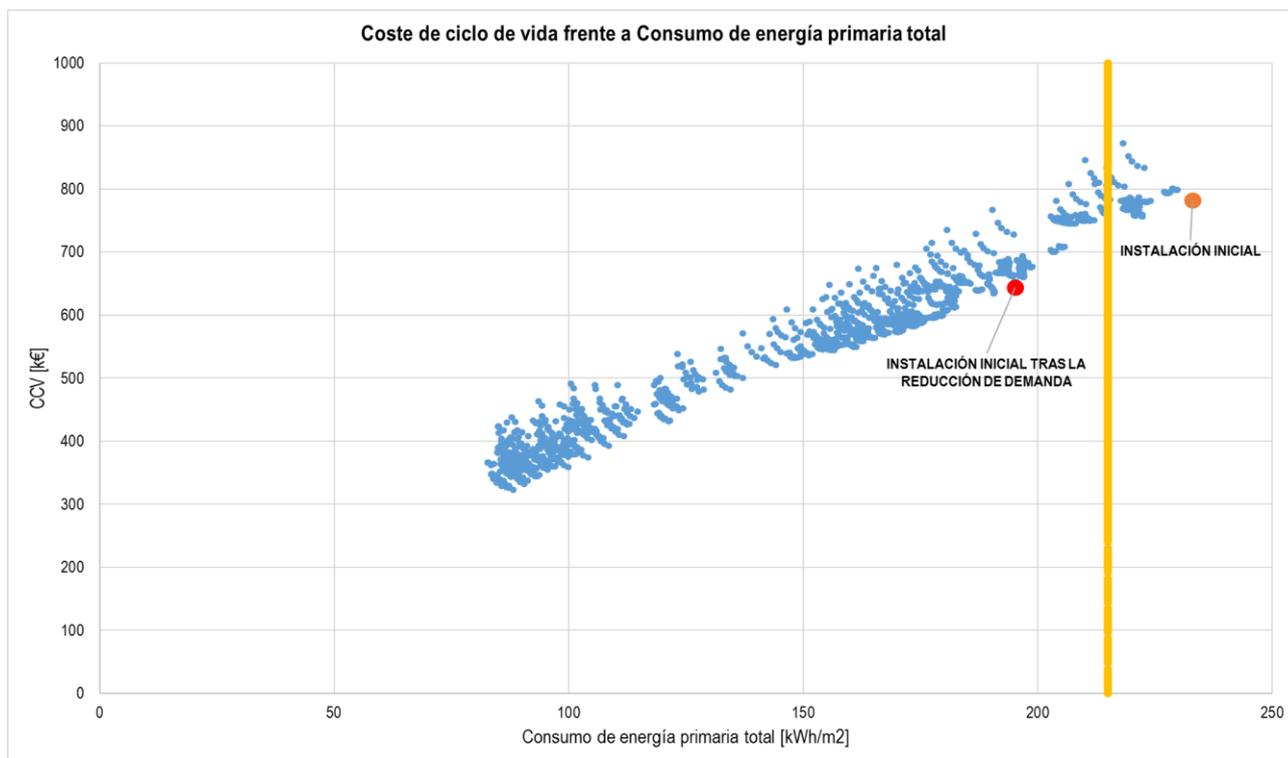


Figura 100. Limitación de la normativa en consumo de energía primaria total. *Fuente: Elaboración propia.*

A partir de las gráficas obtenidas, se puede observar fácilmente que la instalación óptima cumplirá los límites de la normativa ya que la zona de óptimos presenta un menor consumo que el límite establecido.

Para analizar la combinación con menor CCV, se procede a realizar un aumento en la gráfica descartando los valores que no cumplen con la normativa y centrandose en analizar la zona de óptimos, donde se obtiene:

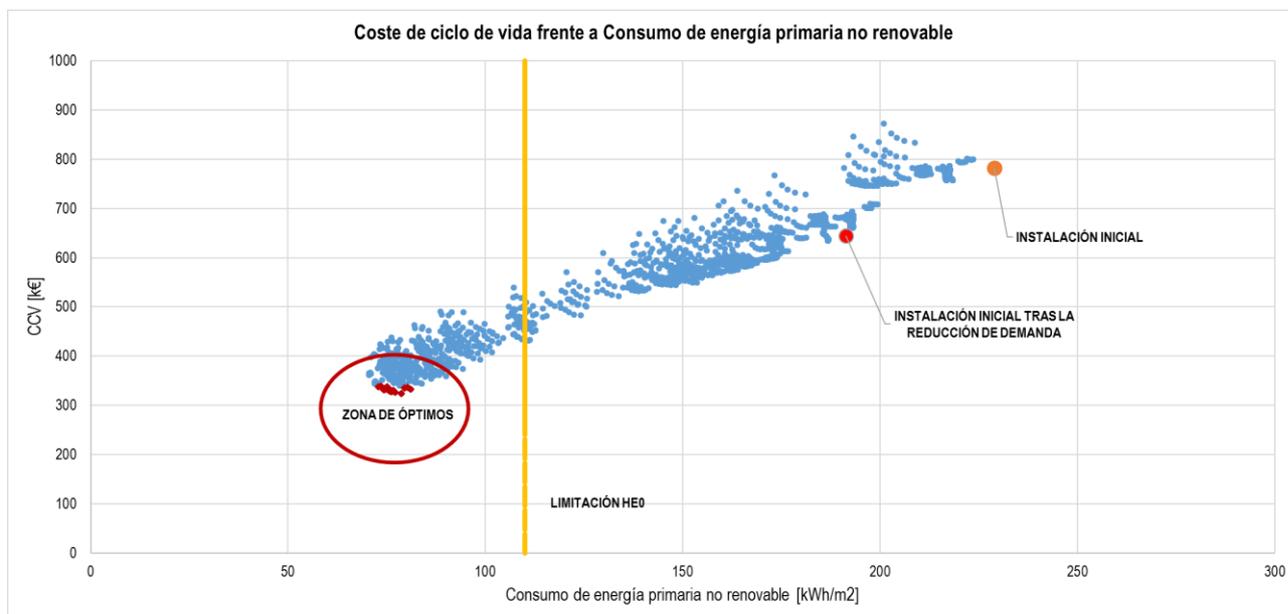


Figura 101. Preselección de combinaciones óptimas. *Fuente: Elaboración propia.*

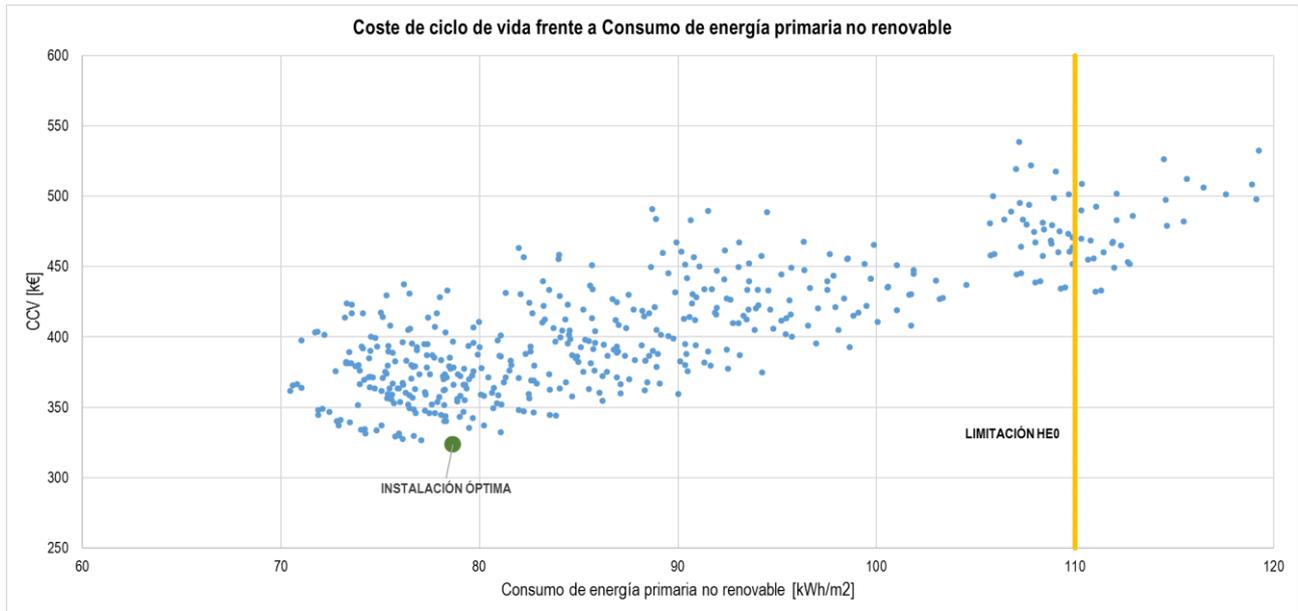


Figura 102. Aumento en la zona de óptimos. *Fuente: Elaboración propia.*

Al aumentar en la zona que interesa para el estudio de la combinación óptima, se busca el punto de la gráfica correspondiente a la instalación con menor CCV. Como se puede observar, la instalación óptima cumplirá los requerimientos de la normativa en cuanto a consumo de energía primaria y, por tanto, se asume como solución viable.

Resulta interesante deshacer el aumento para así poder ver la situación del punto óptimo en la gráfica general respecto a los demás:

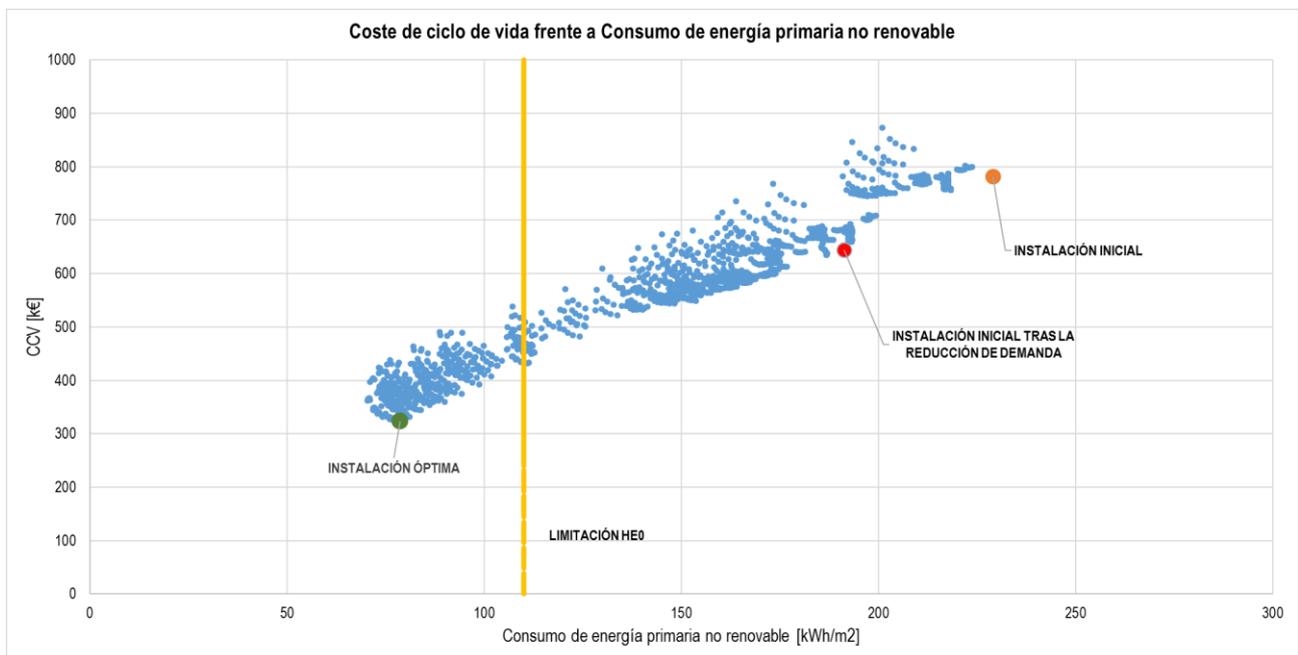


Figura 103. Selección de la combinación óptima. *Fuente: Elaboración propia.*

La combinación seleccionada se caracteriza por llevar asociado un CCV de 323.44 k€ y un consumo de energía primaria no renovable de 78.67 kWh/m² anual. Como se puede observar, cumple los requerimientos de la normativa asociados al consumo de energía primaria, con lo cual asumimos la solución como válida.

Las características de la instalación óptima se detallan a continuación:

- ✓ Potencia nominal de la bomba de calor de 100 kW.
- ✓ Rendimiento nominal de la bomba de calor de 2.5.
- ✓ Volumen del tanque de la bomba de calor de 10 m³.
- ✓ Volumen del tanque de agua caliente sanitaria de 2 m³.

Si se analizan los valores obtenidos en la instalación óptima y los obtenidos en la reducción de demanda además de los datos de partida de la instalación inicial, se obtiene:

Instalación óptima		Instalación tras la reducción de demanda		Instalación inicial	
CCV	323.44 k€	CCV	644.41 k€	CCV	782.02 k€
C.Ep^{NR}	78.67 kWh/m ²	C.Ep^{NR}	191.26 kWh/m ²	C.Ep^{NR}	228.89 kWh/m ²

Tabla 23. Comparación de las instalaciones. Fuente: *Elaboración propia.*

Si se compara la instalación óptima con la instalación tras la reducción de demanda, se tiene una reducción del CCV del 49.8% y una reducción en el consumo de energía primaria del 58.86%. Asimismo, si se compara con la instalación inicial, en ese caso la reducción del CCV es del 58.64% y en el consumo de energía primaria, la reducción resulta del 65.63%. Por lo tanto, una vez comprobado el cumplimiento de la normativa y analizado la reducción de consumo y de CCV, se puede dar por terminado el propósito del proyecto habiendo concluido la optimización del edificio descrito inicialmente.

10 CONCLUSIONES

Con el avance de la tecnología, cada vez son más amplias las opciones de diseño en cualquier ámbito ingenieril. En el caso de la construcción y de las instalaciones de climatización aparece la misma situación. Es por ello que cada vez la normativa es más exigente ya que con el paso de los años aparecen soluciones innovadoras que reducen la contaminación, el consumo y contribuyen a la creación de un mundo más limpio. Si se compara la situación actual con la que había 50 años atrás, se pueden observar los cambios que han ido apareciendo y con un pequeño vistazo se concluye la gran capacidad de mejora que puede tener cualquier proyecto creado en esa época.

En este estudio se tenía como objetivo la optimización de un centro educativo para alcanzar la categoría de edificio de consumo energético casi nulo. Para ello, se ha estudiado en primera instancia la capacidad de reducción de demanda energética en términos de climatización del centro basándose en el Coste de Ciclo de Vida. De esta manera, se ha logrado conocer la alternativa óptima a aplicar en el edificio ya que permite conocer la inversión que se ha de realizar así como el consumo asociado. Cabe destacar la capacidad de mejora que se puede obtener de edificios que no son de nueva construcción mediante la modificación de algunos de sus componentes. En este caso concreto, se ha logrado una reducción de la demanda de calefacción de un 84.51%, de la demanda de refrigeración de un 74.78% así como una disminución del Coste de Ciclo de Vida de un 30.15% en caso de que el centro contase con la instalación de referencia que marca la normativa. Es importante concienciar sobre la importancia de rehabilitar los edificios aplicando las soluciones más eficientes, ayudando así a cumplir la normativa y, lo más importante, reducir la necesidad de consumo de energía en los edificios, manteniendo siempre presente los criterios económicos que determinan la viabilidad de las intervenciones.

En segundo lugar, una vez se hubiera rehabilitado la envuelta del edificio y conseguido la reducción de la demanda, se ha complementado el estudio analizando la capacidad de mejora de la instalación de climatización del centro. Para ello, se ha analizado la instalación existente en el centro y se ha diseñado la instalación tipo a implementar. Se han seleccionado las principales variables de la misma mediante el mismo procedimiento que en la etapa de reducción de demanda. Así, mediante el análisis de las alternativas según su Coste de Ciclo de Vida, se ha logrado la implementación de una instalación que cumple la normativa de ahorro energético. Además, la instalación nueva supondría una reducción del 58.64% del Coste de Ciclo de Vida respecto a la situación inicial así como del 65.63% en términos de consumo de energía primaria no renovable.

Como opciones de mejora y trabajos futuros, por los resultados mostrados a lo largo del proyecto, se destaca la capacidad de mejora del control de la instalación, para así evitar funcionamientos a carga parcial donde el consumo se dispara y quizás no es tan rentable ese aporte energético para el alcance de las condiciones de confort.

En base a los resultados obtenidos, se concluye que el proyecto ha cumplido las expectativas que se tenían al inicio, habiendo conseguido una reducción notoria en el consumo así como un notable aumento de la eficiencia en el funcionamiento de la instalación. Con ello, se ha demostrado numéricamente en un caso de un centro real la gran capacidad de mejora de los edificios existentes.

Por último, destacar el aporte de conocimientos que ha supuesto la elaboración de este proyecto en lo relativo a la elaboración de estudios de Coste de Ciclo de Vida, así como el manejo de la herramienta TRNSYS para futuras aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AEICE, *Estrategias para el diseño de edificios de energía casi nula*.
- [2] Ayuntamiento de Sevilla, *Auditoría C.E.I.P. Concepción Estevarena*, España, 2018.
- [3] Weather Atlas, *Clima en Sevilla*.
- [4] Ministerio de Fomento, *Documento Básico de Ahorro de Energía*, España, 2017.
- [5] Ministerio de Fomento, *Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios*, España, 2017.
- [6] Multiservice Group, *Funcionamiento de caldera*.
- [7] Ivar Group, *Funcionamiento de tanque de almacenamiento*.
- [8] Calfri, *Bombas hidráulicas*.
- [9] Romero Rodríguez, L., *Trabajo Fin de Máster: Análisis de la reducción de consumos energéticos en un edificio al integrar un sistema fotovoltaico y de micro-cogeneración mediante TRNSYS*.
- [10] Solar Energy Laboratory (Univ. of Wisconsin-Madison), TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, CSTB and TESS, *Manuales TRNSYS 2016*.
- [11] IDAE, *Agua caliente sanitaria central*.
- [12] P. Incropera, P. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*.
- [13] Agencia Europea de Medio Ambiente, *La energía en Europa: situación actual*.
- [14] Autopromotores, *Depósitos acumuladores de agua caliente sanitaria*.
- [15] Boiler Guide, *Types of boiler explained*.

- [16] BP, *Statistical Review of World Energy 2019*.
- [17] BP, *Statistical Review of World Energy 2018*.
- [18] Código Técnico de la Edificación, *Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)*.
- [19] Ecointeligencia, *¿En qué consiste el análisis de costes del ciclo de vida?*.
- [20] Enertec, *Tipos de calderas: Caldera convencional*.
- [21] IDAE, *Calener-GT: Grandes edificios terciarios. Manual de curvas*.
- [22] Martínez Jiménez. I., *Análisis de la información técnica en equipos de climatización*.