
DOCUMENTO

Nº1:

MEMORIA

1. OBJETIVOS	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	3
2.1. Interés tecnológico	3
2.2. Líneas de investigación del grupo SIMES (IIE)	4
2.3. Proyecto PCMs con ACCIONA Instalaciones	5
3. ANTECEDENTES	9
3.1. Introducción.....	9
3.2. Tecnologías para el almacenamiento de energía térmica.....	14
3.3. Almacenamiento sensible.....	14
3.4. Almacenamiento latente	15
3.4.1. Almacenamiento termoquímico.....	20
3.6. Estrategias de operación	23
3.7. Normativa	26
3.7.1. Normativa General de Laboratorio y Ensayos.....	26
3.7.2. Normativa Referente a Circuitos Frigoríficos.	27
3.7.3. Normativa Referente a la Seguridad.	27
3.7.4. Normativa Eléctrica.	29
3.7.5. Normativa de Instrumental de Medida.....	30
4. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN	33
4.1. Diseño general del circuito	33
4.2. Tuberías.....	37
4.3. Aislamiento	38
4.4. Válvulas proporcionales y actuadores	39
4.5. Intercambiadores de calor	41
4.6. Depósitos de inercia	42
4.7. Bombas	44
4.8. Llenado con glicol.....	46
4.9. Vasos de expansión.....	47
4.10. Cuadro eléctrico principal	48
4.11. Sistema de adquisición de datos.....	52
4.12. Coriolis.....	53
4.13. Foco frío. Chiller	54

4.14.	Foco caliente	58
4.15.	Adaptación del depósito CALMAC a la instalación	58
5.	PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN	61
5.1.	Coordinación de los trabajos	61
5.2.	Puesta a punto de la instalación	62
5.2.1.	Reparación de fugas	62
5.2.2.	Arranque y recirculación de las bombas	62
5.2.3.	Cálculo de las curvas resistente y motriz	63
5.2.4.	Trabajos en el cuadro eléctrico principal	64
5.2.5.	Puesta a punto del chiller	65
5.2.6.	Control de la instalación	71
5.2.7.	Termopares y termoresistencias de la instalación	72
5.2.8.	Termopares del depósito CALMAC.....	73
5.2.9.	Llenado del depósito CALMAC	75
6.	ENSAYOS REALIZADOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	77
6.1.	Ensayos a realizar	77
6.2.	Ensayos realizados	79
6.3.	Protocolo experimental	80
6.3.1.	Ensayo de carga	80
6.3.2.	Ensayo de descarga	81
7.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	83
7.1.	Análisis de los ensayos.....	83
7.2.	Proceso de carga	83
7.3.	Proceso de descarga	93
7.4.	Comparación entre ensayos	95
7.5.	Conclusiones de los ensayos.....	100
7.5.1.	Cargas	100
7.5.2.	Descargas.....	101
8.	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DEPÓSITO COMPACTO DE 14 KWH.....	103
8.1.	Definición de especificaciones.....	104
8.2.	Diseño conceptual	107
8.3.	Diseño de detalle	113

8.4. Construcción	122
9. CONCLUSIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	129
NORMATIVA:	131
ANEXOS.....	133
ANEXO 1: PUBLICACIONES.....	133
Analysis of an experimental ice-storage installation	135
Experimental analysis of a 173 kwh ice-storage tank.....	138
Ice formation modelling around the coils of an ice storage tank	141
Experimental analysis of the discharge of an ice-storage tank	145
ANEXO 2: ESQUEMA DEL CUADRO ELÉCTRICO PRINCIPAL.....	147
ANEXO 3: ESQUEMA DEL DEPÓSITO CALMAC.....	150

Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del proyecto PCMs 6

Figura 2. Comparación entre sistemas de refrigeración 9

Figura 3. Comparación entre almacenamiento sensible y latente [4] 10

Figura 4. Ejemplo de almacenamiento activo 13

Figura 5. Ejemplo de almacenamiento pasivo..... 13

Figura 6. Clasificación de los materiales usados como PCM [5]..... 16

Figura 7. Temperaturas de fusión de los materiales usados como PCM [4]..... 16

Figura 8. Depósito con cápsulas de PCM y detalle de una cápsula..... 18

Figura 9. Depósito con intercambiador y detalle de los cambios de fase..... 19

Figura 10. Depósito de PCM de contacto directo 19

Figura 11. Depósito de PCM con máquina de hielo 20

Figura 12. Depósito con PCM microencapsulado..... 20

Figura 13. Procesos de absorción y adsorción en hidruros metálicos 21

Figura 14. Operación sin almacenamiento, "full storage" y "partial storage" respectivamente [2] 23

Figura 15. Esquema hidráulico de la instalación PCM..... 34

Figura 16. Esquemas hidráulico y de control de la instalación PCM..... 36

Figura 17. Intervalo de temperaturas de fusión medias recomendadas 38

Figura 18. Croquis de la sección de un tubo aislado [19]..... 38

Figura 19. Válvula de tres vías proporcional VXG.40.41 de SIEMENS..... 40

Figura 20. Esquema del funcionamiento de la válvula proporcional 40

Figura 21. Calefactor para el vástago de la válvula del foco frío..... 41

Figura 22. Interfaz del SWEP Software Packge..... 41

Figura 23. Croquis intercambiador B25T..... 42

Figura 24. Depósito de inercia del circuito secundario 44

Figura 25. Interfaz del programa SF Pressure Drop 45

Figura 26. Sección de la bomba CRE 5-5 45

Figura 27. Curvas de altura motriz de la bomba CRE 5-5 45

Figura 28. Esquema y curvas de la bomba CH4-40 46

Figura 29. Vasos de expansión del circuito primario y secundario 48

Figura 30. Selectores de maniobra de las bombas y del chiller 50

Figura 31. Flujostato diferencial SFS..... 51

Figura 32. Alarmas de los flujostatos y presostatos 52

Figura 33. Data logger 34970A y multiplexores 52

Figura 34. Interfaz del software BenchLink Data Logger 3..... 53

Figura 35. Coriolis de SIEMENS en la instalación..... 54

Figura 36. Interfaz principal del IMST-ART 55

Figura 37. Ciclo termodinámico teórico 56

Figura 38. Efecto del recalentamiento sobre la potencia frigorífica..... 57

Figura 39. Efecto del recalentamiento sobre el COP 57

Figura 40. Efecto del recalentamiento sobre la potencia consumida.....	58
Figura 41. Esquema del recorrido del fluido caloportador en el depósito	59
Figura 42. Detalle de uno de los colectores modificados.....	60
Figura 43. Detalles de la recepción del depósito CALMAC ICEBANK	61
Figura 44. Display y curvas motrices de la bomba Grundfos CRE 5-5.....	62
Figura 45. Interfaz del programa SF Pressure drop.....	63
Figura 46. Cuadro eléctrico principal.....	64
Figura 47. Analizador de redes del chiller Camille Bauer Sineax DME442.....	65
Figura 48. Flujostatos de presión diferencial del evaporador y condensador.....	66
Figura 49. Detalle de los manómetros digitales	67
Figura 50. Detalle de capilares y sensores de presión en la succión.....	68
Figura 51. Sensor de presión ROSEMOUNT	68
Figura 52. Captura de pantalla del Plant Visor de Carel.....	69
Figura 53. Detalle del display del microchiller	70
Figura 54. Chiller en la instalación tras la puesta en marcha.....	71
Figura 55. PIDs del cuadro eléctrico principal	72
Figura 56. Detalle de dos termopares y croquis de un termopozo.....	73
Figura 57. Croquis distribución termopares en depósito CALMAC.....	74
Figura 58. Detalle fijación de los termopares de las triadas	74
Figura 59. Detalle del aislamiento térmico de los termopares	75
Figura 60. Detalle impermeabilización triada superior	75
Figura 61. Ensayos de carga.....	77
Figura 62. Ensayos de descarga "upstream"	78
Figura 63. Ensayos de descarga "downstream"	79
Figura 64. Temperaturas de las regletas interior y exterior (carga E1).....	84
Figura 65. Comparación de tres ensayos de carga.....	85
Figura 66. Temperaturas de las triadas superior e inferior (carga E1).....	86
Figura 67. Temperatura del fluido caloportador en parte sensible, antes de la inversión de densidad (carga E1)	87
Figura 68. Temperatura del fluido caloportador en parte sensible, tras la inversión de densidad (carga E1)	87
Figura 69. Temperatura del fluido caloportador en la parte latente (carga E1).....	87
Figura 70. Caudal del bucle primario (carga E1).....	88
Figura 71. Temperaturas en el bucle secundario (carga E1)	89
Figura 72. Presiones alta y baja del chiller (carga E1)	90
Figura 73. Temperaturas en el evaporador (carga E1).....	91
Figura 74. Temperaturas en el condensador (carga E1)	92
Figura 75. Potencia consumida por el chiller (carga E1)	92
Figura 76. Temperaturas de las regletas interior y exterior (descarga E2).....	94
Figura 77. Temperaturas de las triadas interior y exterior (descarga E2).....	94
Figura 78. Caudal del bucle primario (descarga E2)	95

Figura 79. Duración de los ensayos de carga con 50 kWh de capacidad 97

Figura 80. Duración de los ensayos de carga con 138 kWh de capacidad 99

Figura 81. Comparación de los ensayos de carga..... 100

Figura 83. Resumen del proceso de diseño del depósito COMPACTO 104

Figura 84. Idea inicial para el depósito compacto de PCMs..... 105

Figura 84. Croquis inicial del depósito..... 108

Figura 85. Esquema de la distribución del serpentín en POLIETILENO 3 y 4..... 110

Figura 86. Distribución del serpentín en el depósito COMPACTO 112

Figura 87. Despiece de la vasija 116

Figura 88. Vasija más aislamiento 118

Figura 89. Vasija ensamblada con el intercambiador de calor..... 119

Figura 90. Plano de la estructura del intercambiador 120

Figura 91. Plano de las pletinas del intercambiador 121

Figura 94. Fabricación de la vasija en las instalaciones de PROMINOX 122

Figura 95. Proceso de fabricación de las espirales 123

Figura 94. Espiral montada sobre la matriz 123

Figura 95. Corte, escariado, recalibrado y marcado de los extremos..... 124

Figura 96. Resultado tras el ensamblado de los tubos y de las pletinas..... 124

Figura 97. Detalle de la soldadura de las pletinas..... 125

Figura 98. Colectores secundarios tras el taladrado/extrusión y soldados a los tubos..... 125

Figura 99. Ensamblado de los colectores primarios y secundarios..... 126

Tablas

Tabla 1. Cronograma del proyecto PCMs.....	7
Tabla 2. Materiales PCM objeto de estudio	8
Tabla 3. Comparación del COP durante distintos modos de operación [6]	11
Tabla 4. Propiedades físicas de algunos PCMs orgánicos [6]	17
Tabla 5. Propiedades físicas de algunos PCMs inorgánicos [6]	18
Tabla 6. Comparación de tipos de almacenamiento térmico [4]	22
Tabla 7. Comparación almacenamiento sensible y latente [8]	22
Tabla 8. Modos de operación de los almacenamientos térmicos [18]	25
Tabla 9. Cálculo de la sección de la tubería.....	37
Tabla 10. Composición del material de aporte seleccionado	38
Tabla 11. Aislamiento mínimo (mm) para tuberías con fluidos calientes [19]	39
Tabla 12. Aislamiento mínimo (mm) para tuberías con fluidos fríos [19].....	39
Tabla 13. Características físicas en función de la concentración de glicol [20]	47
Tabla 14. Resumen del análisis del ciclo.....	56
Tabla 15. Resumen de los ensayos con 50kWh de capacidad	79
Tabla 16. Resumen de los ensayos con 138kWh de capacidad	80
Tabla 17. Balance térmico de los ensayos de carga con 50 kWh.....	96
Tabla 18. Balance térmico de los ensayos de descarga con 50 kWh	96
Tabla 19. Análisis de los consumos de los ensayos de carga con 50 kWh	96
Tabla 20. Análisis de los consumos de los ensayos de descarga con 50 kWh	96
Tabla 21. Balance térmico de los ensayos de carga con 138 kWh.....	98
Tabla 22. Balance térmico de los ensayos de descarga con 138 kWh	98
Tabla 23. Análisis de los consumos de los ensayos de carga con 138 kWh	98
Tabla 24. Análisis de los consumos de los ensayos de descarga con 138 kWh	98
Tabla 25. Resumen de PCMs a ensayar en el depósito compacto	105
Tabla 26. Criterios de diseño para el depósito COMPACTO.....	106
Tabla 27. Especificaciones técnicas para el depósito COMPACTO.....	107
Tabla 28. Resumen de las opciones a estudiar para la fabricación del depósito.....	108
Tabla 29. Resumen de las prestaciones de cada opción	111
Tabla 30. Resumen de las prestaciones del depósito COMPACTO	113
Tabla 31. Tubos seleccionados para el intercambiador	119

1. OBJETIVOS

El objetivo esencial del presente Proyecto Final de Carrera (PFC), consiste en el diseño, puesta a punto y posterior análisis de una instalación experimental de almacenamiento térmico utilizando agua como material de cambio de fase (“Phase-change-material”, PCM). Utilizar agua en lugar de otros materiales de cambio de fase conlleva un menor coste de inversión y por ello es el material de cambio de fase más utilizado. Sin embargo el análisis de los procesos de carga y descarga no es trivial y requiere de una caracterización experimental adecuada.

Este PFC está englobado en un proyecto de mayor envergadura fruto de la colaboración entre el Instituto de Ingeniería Energética (IIE) y ACCIONA Infraestructuras, en el que se ensayarán otros tipos de materiales de cambio de fase con el fin de analizar su comportamiento, y en consecuencia, sus aplicaciones más interesantes. En el apartado 2.2 se detallan todas las líneas de trabajo del proyecto, aunque para mayor claridad, en el presente apartado se exponen únicamente los objetivos concretos de este PFC.

En una primera fase, este PFC tiene como objetivo el diseño de las instalaciones del IIE y la selección de los equipos. Para ello, conviene tener claro desde el inicio que la instalación no sólo servirá para caracterizar agua como material de cambio de fase, sino también otros materiales PCM en el rango de temperaturas de -10°C a 100°C .

En una segunda fase, se realizará el seguimiento de los trabajos y puesta a punto de la instalación, incluyendo la instrumentación y calibración de todos los componentes. Tras esta fase, se caracterizará un depósito comercial (CALMAC ICEBANK) sometiénolo a ensayos de carga y descarga con condiciones de operación distintas. El análisis de los ensayos puede consultarse en el capítulo 7 de la presente memoria.

Paralelamente a esta fase de caracterización experimental, y con la experiencia adquirida durante la puesta a punto de la instalación, se diseñará un depósito de PCMs más compacto que el comercial con el fin de reducir el coste económico de los ensayos y capaz de resistir PCMs de naturaleza muy distinta. El capítulo 8 de la presente memoria resume todo el proceso de diseño del depósito compacto.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1. Interés tecnológico

El desarrollo de las sociedades está fuertemente ligado al consumo de energía. Es por esto que dicho consumo no para de crecer y, a medida que esto ocurre el panorama energético se vuelve más complejo. Por un lado, la utilización durante décadas de combustibles fósiles ha creado a los países desarrollados una situación de dependencia energética del exterior, importantes problemas medioambientales y ha llevado finalmente a la escasez de estas fuentes.

Por otro lado, muchas de las tecnologías empleadas para la generación de energía eléctrica tienen problemas para adaptar la producción a la demanda. Por ejemplo, las energías renovables como la eólica o la solar no se encuentran disponibles a voluntad, en la cantidad y en el momento en que se necesitan. Otra cuestión es la de tecnologías como la de los reactores nucleares o las turbinas de vapor, que debido a su inercia exigen que la generación se mantenga a un nivel constante, mientras que ni los patrones de consumo ni la aportación renovable lo son.

A estas dificultades se le suma la limitación de los recursos hídricos y la madurez de su explotación para generar energía eléctrica. Cabe aclarar que estos recursos juegan un papel muy importante en los sistemas energéticos de los países, pues son un potencial autóctono y renovable que se explota con una tecnología que permite generar electricidad prácticamente en cualquier momento, permitiendo adaptar la generación al consumo.

Frente a estos retos que plantea la situación energética actual, se hacen necesarias diversas actuaciones encaminadas a aumentar la capacidad de generación, mejorar los sistemas de almacenamiento y distribución y maximizar el ahorro energético, todo ello con un impacto ambiental mínimo. Este proyecto puede contribuir a algunos de estos propósitos. Uno de ellos es el del ahorro energético, bien evitando el consumo de energía o bien tratando de mejorar la eficiencia de los sistemas que utilizan energía eléctrica.

El almacenamiento latente de energía térmica activo, como el tratado en este proyecto, puede contribuir a este último fin. Dos puntos importantes a favor de estos sistemas son su alta compacidad y que el almacenamiento se da en una banda de temperaturas muy estrecha. Esto permite reducir las pérdidas térmicas y es más eficiente de cara a los sistemas de energía que generan calor/frío a almacenar. Igualmente, para la recuperación de ese calor/frío almacenado también es útil que se haga a temperatura constante.

El almacenamiento latente de energía térmica resulta conceptualmente más eficiente que el sensible, ya que, utilizando materiales adecuados, para el mismo volumen y la misma temperatura un almacenamiento latente suma a la energía sensible la del cambio de fase.

Otro aspecto relacionado con la posibilidad de almacenar energía, teniendo en cuenta el actual sistema tarifario eléctrico en el que la electricidad es más barata cuando el consumo global es menor, es que para el usuario este sistema puede tener ventajas económicas: se puede almacenar la energía durante las horas en la que ésta es más barata para utilizarla en las horas en las que su compra resulta más cara.

El almacenamiento latente de energía térmica tiene numerosas aplicaciones. Algunos ejemplos del uso de los sistemas activos en sus campos de aplicación se describen a continuación:

- Los sistemas con PCM pueden ser útiles para estabilizar la temperatura de uno de los focos térmicos de enfriadoras o bombas de calor. Por ejemplo, una enfriadora podría disipar calor a un PCM a 25°C en lugar de al ambiente a 35°C, como ocurriría al disipar calor al ambiente durante el día. Por la noche, este PCM se descargaría con el ambiente exterior (más frío). Bajar 10°C en la unidad condensadora implica una mejora sensible en la eficiencia de estos sistemas.
- En refrigeración pueden actuar subenfriando el fluido refrigerante a la salida del condensador, con lo que se evita un trabajo por parte del compresor en su rango más ineficiente.
- En calefacción, es muy frecuente almacenar agua caliente en depósitos. Utilizando un almacenamiento latente o mixto en lugar de uno sensible se podría almacenar más energía en el mismo espacio, como se ha comentado antes.

Estas ventajas y sus aplicaciones han hecho que muchas empresas se hayan interesado recientemente en los sistemas de almacenamiento latente, especialmente en los sistemas pasivos aunque también en los sistemas activos. En el caso de ACCIONA Instalaciones, su objetivo es conocer en qué medida el uso de estos sistemas supone realmente un ahorro económico o de energía.

2.2. Líneas de investigación del grupo SIMES (IIE)

A la vista del panorama energético descrito, es evidente la importancia de la investigación en materia energética para tratar de resolver los problemas que se plantean y de mejorar las soluciones propuestas a medida que avanza la misma investigación. Con este objetivo, el IIE consta de un grupo multidisciplinar con el objetivo de abordar de forma integral todo este tipo de problemas.

Así, el IIE se divide en seis áreas de actividad: área térmica, nuclear, eléctrica, renovable, prospectiva y evaluación y aplicaciones no energéticas. Sus actividades se desarrollan en estrecha colaboración con universidades, centros de investigación y empresas a nivel nacional e internacional. En particular, el área térmica se centra en investigaciones relacionadas con la transmisión de calor y la modelización de flujos y sistemas térmicos, con campos de aplicación muy diversos dentro de la climatización, calefacción y la refrigeración.

Se busca con particular énfasis sistemas con mayor eficiencia (como por ejemplo refrigeración magnética, bombas de calor geotérmicas, etc.) y la utilización de refrigerantes no contaminantes como el propano. Es en esta área donde se enmarca la actividad del grupo SIMES, dedicado principalmente a la simulación de sistemas energéticos, por lo cual recibe su nombre (Simulation of Energy Systems).

El grupo SIMES fue creado en Octubre de 2007. Actualmente está desarrollando varios proyectos de investigación para la empresa ACCIONA (Infraestructuras e Instalaciones) con un presupuesto del orden de 150 000 € anuales.

Las competencias del grupo quedan definidas por las siguientes actividades:

- Reducción del consumo de edificios mediante mejoras pasivas
- Diseño y modelado de sistemas para la producción de energía
- Optimización energética de instalaciones
- Análisis energético-económico de distintos escenarios de aplicación
- Optimización de la operación y estrategias de control
- Recepción y monitorización de instalaciones

Para desarrollar estas actividades se analizan, entre otros, sistemas de energía no convencionales como son la geotermia, los colectores solares planos con tubos de vacío, algunos sistemas de cogeneración (MCI, micro turbinas de gas y ciclo ORC), las máquinas de absorción para refrigeración solar y la energía fotovoltaica.

Dentro del grupo, estas actividades encuentran aplicación en edificios con gestión centralizada como hoteles u oficinas, en viviendas y en zonas residenciales.

2.3. Proyecto PCMs con ACCIONA Instalaciones

El proyecto de colaboración entre ACCIONA Instalaciones y el grupo SIMES nace con el propósito general de conocer en qué medida el uso de los sistemas con PCMs puede favorecer la eficiencia energética e incluso suponer un ahorro económico.

Surge entonces la necesidad de crear un grupo de trabajo en el grupo SIMES especializado en PCMs, que sea capaz de abarcar el diseño y puesta a punto de las

instalaciones del laboratorio, el análisis de los resultados obtenidos y el desarrollo de los posteriores modelos matemáticos que simulen el comportamiento de éstos elementos en instalaciones reales, con el objetivo detectar los escenarios idóneos para la aplicación de este tipo de sistemas de almacenamiento.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del proyecto de PCMs, donde se detalla tanto la labor desempeñada por cada miembro del equipo como los principales flujos de información.

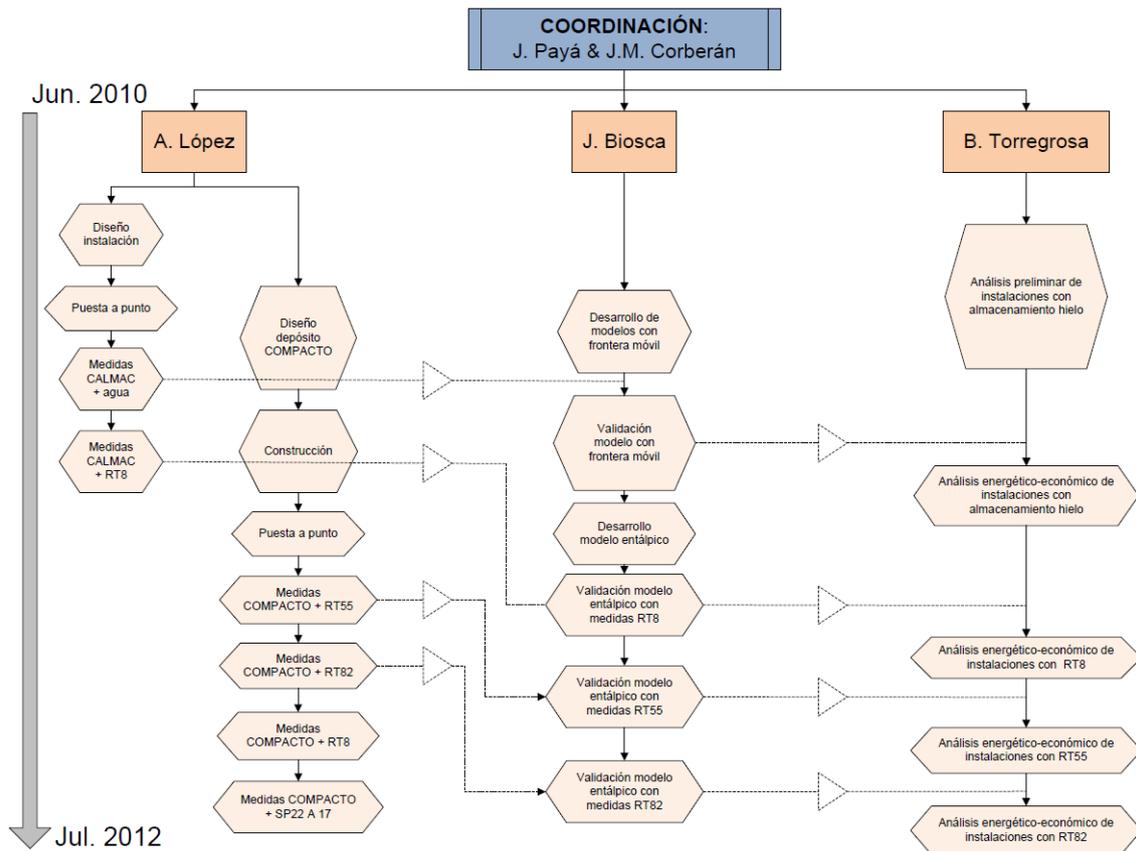


Figura 1. Diagrama de flujo del proyecto PCMs

Las líneas de trabajo del grupo PCMs desde el inicio hasta el final del proyecto (Junio 2010 – Julio 2012) son:

- Diseño y puesta en marcha de una instalación en el laboratorio del IIE para el ensayo de dos tanques contenedores de PCMs: un depósito comercial (CALMAC Icebank) y otro más compacto diseñado y fabricado por el grupo SIMES.
- Diseño y construcción de un depósito compacto de PCMs que permita trabajar en un amplio rango de temperaturas.
- Caracterización de los depósitos/PCMs para diferentes temperaturas y caudales de trabajo.
- Caracterización de diversos materiales PCM con distinta temperatura de fusión.
- Simulación de instalaciones completas con PCMs, análisis del comportamiento de estos sistemas y optimización de su operación.
- Desarrollo de modelos matemáticos de los depósitos de PCMs para el estudio y optimización de diferentes configuraciones y diseños de los depósitos.

En concreto, en la Tabla 1 se desglosan las fechas establecidas para el inicio y final de cada línea de trabajo y tarea a lo largo del proyecto, con el objetivo de cumplir los plazos establecidos.

CRONOGRAMA DEL PROYECTO PCMs							
	2010		2011			2012	
DEPÓSITO COMERCIAL CALMAC							
Pedido y recepción	jul-10						
Diseño y construcción de la instalación	sep-10		ene-11				
Puesta a punto			feb-11	jun-11			
Medidas con AGUA				jun-11	sep-11		
Medidas con PCM8					sep-11	dic-11	
DEPÓSITO COMPACTO							
Diseño		nov-10			sep-11		
Montaje y puesta a punto						oct-11	ene-12
Medidas con todos los PCMs						ene-12	jul-12
MODELADO							
ANÁLISIS APLICACIONES PRÁCTICAS							

Tabla 1. Cronograma del proyecto PCMs

En la Tabla 2 se detallan los niveles de temperatura que se analizarán junto con el depósito y el material PCM correspondiente, todos ellos suministrados por Rubitherm, a excepción del agua.

Temperatura cambio de fase (°C)	Material	Depósito
0	Agua/hielo	CALMAC/COMPACTO
7-10	Polietilenglicol	CALMAC/COMPACTO
50-65	Parafina	COMPACTO
80-95	Parafina	COMPACTO
20-25	Parafina	COMPACTO

Tabla 2. Materiales PCM objeto de estudio

El almacenamiento térmico con PCMs posee un importante potencial para contribuir a la eficiencia energética, y por ello surge la colaboración entre el IIE y ACCIONA Instalaciones.

A lo largo del proyecto se van a abrir varias líneas de trabajo con los objetivos de ensayar distintos tipos de PCMs, evaluar los resultados y desarrollar modelos matemáticos que simulen el comportamiento de éstos elementos en instalaciones reales, con el fin de detectar los escenarios idóneos para la aplicación de este tipo de sistemas de almacenamiento.

3. ANTECEDENTES

3.1. Introducción

En este apartado se van a describir las características del almacenamiento de energía térmica, los distintos tipos que existen y las posibilidades de operación que éstos sistemas ofrecen, con el fin de revisar el estado de arte en el campo del almacenamiento térmico.

La acumulación de energía térmica es interesante técnicamente por la flexibilidad que ofrece a los sistemas de generación en climatización y procesos industriales, y cobra un interés aún mayor cuando se dan algunas condiciones que la hacen más viable económicamente, como son:

- Existencia de cargas esporádicas, cíclicas o de corta duración
- La generación y la demanda de energía térmica no coinciden
- Existen grandes picos de consumo en la demanda
- Existe una diferenciación horaria en la tarifa eléctrica

En estos casos, la inclusión de un sistema de almacenamiento térmico que extraiga o ceda calor al dispositivo de acumulación para recuperarlo en otro momento, permite reducir la capacidad de los equipos, traduciéndose esto en una menor inversión económica. La Figura 2 muestra la comparación entre dos sistemas de refrigeración, uno convencional y otro con acumulación de frío con agua como material de cambio de fase. El sistema convencional tiene que satisfacer toda la demanda de forma instantánea. Con el sistema de acumulación, si la enfriadora trabaja todo el día, pero a mitad de capacidad, es posible satisfacer la misma demanda.

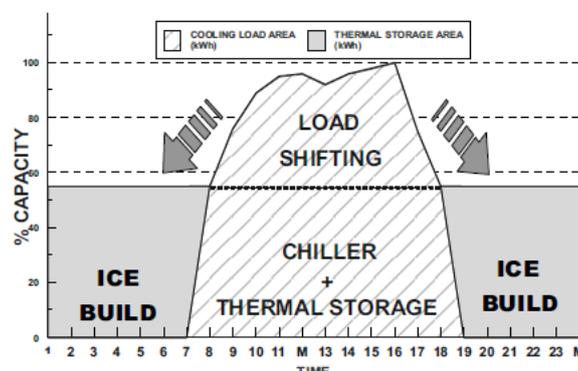


Figura 2. Comparación entre sistemas de refrigeración

A continuación se listan los tres grandes tipos de almacenamiento de energía térmica que existen actualmente, bien comercialmente o en investigación, y que se explican más en detalle en los próximos apartados:

- Almacenamiento sensible: calor asociado a una diferencia de temperaturas
- Almacenamiento latente: calor asociado a un cambio de fase
- Almacenamiento termoquímico: calor asociado a una reacción química reversible

El almacenamiento sensible es utilizado ampliamente hoy en día en muchas instalaciones como las de energía solar térmica, pero tiene el inconveniente de tener elevadas pérdidas. De hecho, según la agenda estratégica de investigación europea, uno de los factores clave para el futuro desarrollo de la energía solar térmica consiste en obtener métodos más eficientes de almacenamiento.

La Figura 3 compara un almacenamiento sensible y uno latente, donde se puede apreciar que en el segundo la temperatura es constante durante el cambio de fase y como consecuencia las pérdidas por kWh acumulado también lo son. Otra ventaja que presenta la acumulación en la fase sensible frente a la latente, es que no hay que aumentar la temperatura del almacenamiento para aumentar la energía acumulada, lo que implica que los equipos pueden ser de menor potencia y menores gastos tanto en inversión como en explotación. Además, para una misma capacidad de almacenamiento, los sistemas latentes son del orden de 2 a 10 veces más compactos que con el almacenamiento sensible convencional.

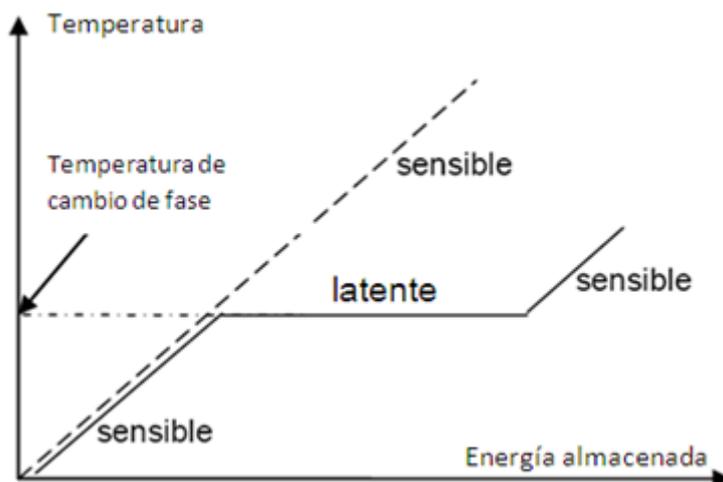


Figura 3. Comparación entre almacenamiento sensible y latente [4]

Las ventajas que ofrece el almacenaje de energía térmica frente a los sistemas donde la generación se produce simultáneamente a la demanda son varias:

- Si se trata de almacenamiento de frío por la noche, se trabaja con tarifas eléctricas más baratas, pues el mayor consumo de energía se produce durante las horas valle.
- Reducción de la temperatura de condensación de los equipos al trabajar con temperaturas menos extremas, lo que implica una mejora del COP y en un ahorro de hasta un 15%.
- Menor capacidad necesaria en el chiller o caldera (30-70%), lo que conlleva un menor coste de inversión y explotación.
- Se evitan constantes arranques y paradas de los equipos generadores, ya que trabajan a plena carga sin ciclar.
- Reducción de las emisiones de CO₂.
- Mejora en la operación de los equipos al desacoplar generación y demanda.
- Mejora la seguridad del abastecimiento de energía al comportarse como un sistema de apoyo.

En la Tabla 3 la mejora de la eficiencia que se produce en un chiller cuando trabaja por la noche, con menor temperatura de condensación. Los COPs son valores teóricos pero permiten analizar el efecto de la temperatura de los dos focos de temperatura.

	operation in daytime without storage	at nighttime with ice storage	at nighttime with a LHS with phase change tem- perature 10 °C
outside	35 °C	20 °C	20 °C
condenser	40 °C	25 °C	25 °C
evaporator	5 °C	-5 °C	5 °C
storage	-	0 °C	10 °C
cooling circuit	10 °C	10 °C	15 °C
COP	$(273+5)/(40-5) = 7.8$	$(273-5)/(25-5) = 8.9$	$(273+5)/(25-5) = 13.9$

Tabla 3. Comparación del COP durante distintos modos de operación [6]

Es importante analizar cada caso en detalle, pues cada sistema posee unas características que se deben tener en cuenta a la hora de diseñarlo con el fin de optimizar los costes de inversión y operación. Estas variables a tener en cuenta al diseñar un sistema de almacenamiento térmico son:

- La curva de demanda de refrigeración o calefacción
- El rango de temperaturas de operación
- La capacidad de almacenamiento

- La potencia necesaria en las cargas y descargas
- Las pérdidas y la duración del almacenamiento
- Los costes de inversión y operación
- La compatibilidad de los materiales utilizados

Además, los materiales utilizados para almacenar la energía térmica han de cumplir en la medida de lo posible una serie de especificaciones técnicas que harán más interesante su uso como acumulador de energía térmica:

- Alta densidad
- Elevados calor latente y específico
- Reacción reversible exotérmica (en caso de almacenamiento termoquímico)
- Alta conductividad del calor
- No degradar sus propiedades con el tiempo
- Compatibilidad con el resto de materiales del sistema
- Abundancia, disponibilidad y bajo coste
- Respetuoso con el medio ambiente
- Almacenamiento a presión atmosférica

Existen varias clasificaciones para los sistemas de almacenamiento térmico, las cuales se listan a continuación:

- Según el medio utilizado para el almacenamiento

Almacenamiento de frío	Almacenamiento de calor
<ul style="list-style-type: none">○ Agua / hielo○ Fluidos acuosos y no acuosos○ Materiales con cambio de fase	<ul style="list-style-type: none">○ Agua○ Piedra / Roca○ Materiales cerámicos○ Parafinas○ Aceite

- Según el tipo de almacenamiento
 - Almacenamiento sensible
 - Almacenamiento latente
 - Almacenamiento termoquímico

- Según el tipo de distribución
 - Almacenamiento activo: es aquel en donde el fluido caloportador está en movimiento, tal y como muestra la Figura 4. Este es el tipo de sistema más aplicado en instalaciones energéticas y es el objeto de este PFC.

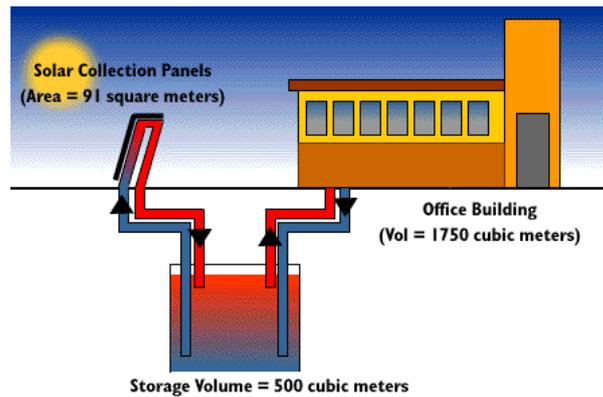


Figura 4. Ejemplo de almacenamiento activo

- Almacenamiento pasivo: es aquel donde el captador de calor y el almacenamiento están integrados en el propio punto de consumo. La Figura 5 muestra un ejemplo de aplicación de muros de PCM integrados en la edificación. El almacenamiento pasivo es más propio de viviendas “cero emisiones” tales como las perseguidas por la Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP).

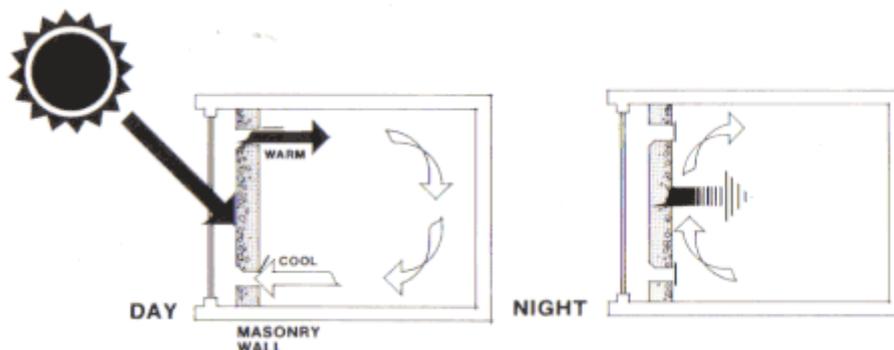


Figura 5. Ejemplo de almacenamiento pasivo

3.2. Tecnologías para el almacenamiento de energía térmica

Hoy en día existen multitud de tecnologías para el almacenamiento de la energía térmica, las cuales se pueden englobar como almacenamiento sensible, latente y termoquímico y que son descritas en éste apartado.

3.3. Almacenamiento sensible

Este tipo de sistemas consiste en el enfriamiento o calentamiento de un material líquido o sólido, normalmente con un gran calor específico, sin que exista cambio de fase.

El material más utilizado para éste tipo de acumulación es el agua, aunque también pueden usarse otros como líquidos orgánicos, sales o metales líquidos en caso de ser almacenamiento en fase líquida, y metales, minerales o cerámicas en caso de ser en fase sólida.

Las ventajas de este tipo de acumulación es que es más económica y sencilla de operar, mientras que el inconveniente más importante que conlleva es que requiere de un gran volumen de material y un aumento de la temperatura elevado para acumular grandes cantidades de energía.

Algunos ejemplos de sistemas de almacenamiento sensible son:

- Con agua

El almacenamiento térmico latente con agua ha estado siempre muy extendido tanto en instalaciones de refrigeración como en calefacción y agua caliente sanitaria, y últimamente también en las instalaciones termosolares de baja temperatura.

Su uso como acumulador presenta un gran número de ventajas:

- Abundante y disponible
- No es tóxico ni inflamable
- Alta densidad y calor específico
- El agua puede ser fluido caloportador
- Simplicidad del sistema
- Se puede aprovechar la convección natural

Pero también algunas desventajas:

- Restringido a temperaturas comprendidas entre 0 y 100°C si no se le añaden anticongelantes
- Problemas de corrosión en las instalaciones
- Menor estratificación térmica que otros materiales

- Con piedras

El uso de piedras como material acumulador de calor, es el más utilizado para temperaturas comprendidas entre 100 y 1000°C por el gran número de ventajas que presenta frente a sus desventajas.

Ventajas:

- Sencillez de diseño y operación
- Barato (coste similar a sistemas con agua)
- No tóxico ni inflamable
- Fluido caloportador y medio de almacenamiento están en contacto

Desventajas:

- Menor capacidad que el agua, lo que implica un mayor volumen para una misma cantidad de energía acumulada.

3.4. Almacenamiento latente

Éste tipo de almacenamiento se caracteriza por utilizar materiales de cambio de fase que emplean la energía almacenada para cambiar de estado sin aumentar sustancialmente la temperatura, lo que implica que las pérdidas no aumentan conforme aumenta la energía acumulada.

Tradicionalmente se ha utilizado el agua como el PCM mayoritario, pero hoy en día existe ya una gran variedad de materiales de cambio de fase en función de las temperaturas de trabajo. La Figura 6 presenta las familias de materiales más importantes que se usan o están bajo desarrollo como PCM en almacenamiento térmico.

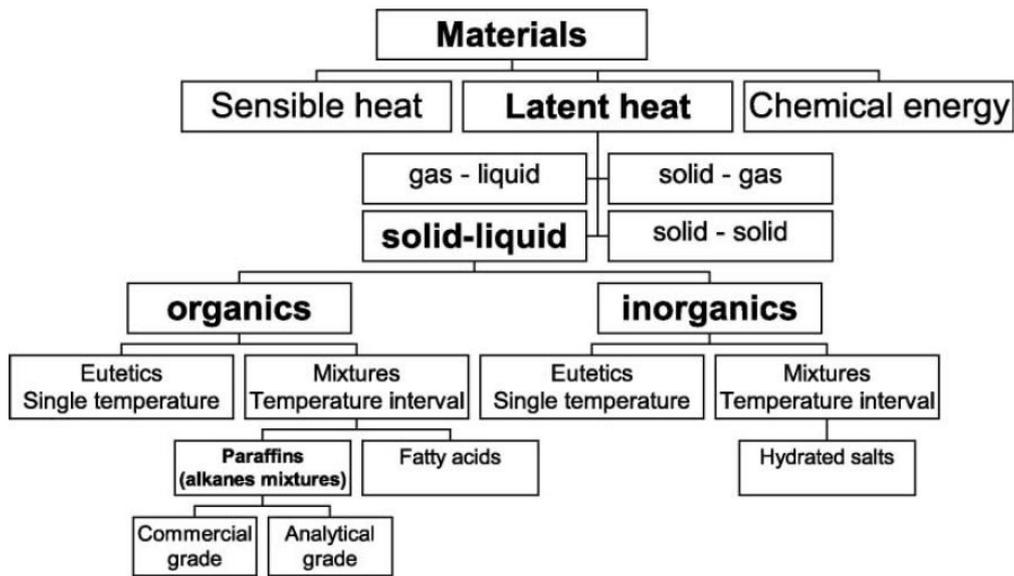


Figura 6. Clasificación de los materiales usados como PCM [5]

La Figura 7 muestra tanto las temperaturas de fusión como las correspondientes entalpías de cambio de fase de los materiales usados como PCM, donde los que se encuentran dentro del recuadro rojo son los más interesantes en aplicaciones de climatización de edificios.

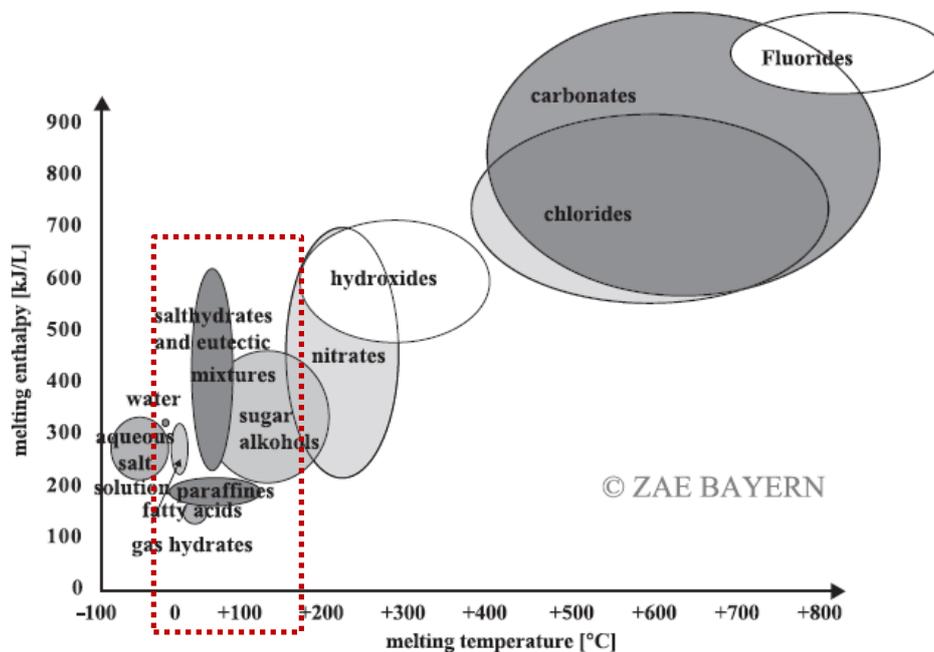


Figura 7. Temperaturas de fusión de los materiales usados como PCM [4]

- Materiales inorgánicos

Los materiales inorgánicos pueden tener distintas aplicaciones según la naturaleza del material y como consecuencia, según cuál sea el correspondiente rango de temperaturas de cambio de fase. Los materiales orgánicos más conocidos son:

- Solución acuosa con sales: de -30°C a 0°C
- Agua: 0°C
- Sales hidratadas: de 5°C a 130°C

Estos materiales generalmente poseen una densidad mayor que 1 g/cm³, presentan la ventaja de ser más compactos que los materiales orgánicos y el inconveniente de poder causar problemas de corrosión con los elementos metálicos de la instalación.

Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
H ₂ O	0	333 334	0.612 (liquid, 20 °C)	998 (liquid, 20 °C) 917 (solid, 0 °C)
LiClO ₃ ·3H ₂ O	8	253	Not available	1,720
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29 30	171, 192	0.540 (liquid, 39 °C) 1.088 (solid, 23 °C)	1,562 (liquid, 32 °C), 1,496 (liquid), 1,802 (solid, 24 °C) 1,710 (solid, 25 °C)
Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O	58	226, 264	Not available	1,280 (liquid)

Tabla 4. Propiedades físicas de algunos PCMs orgánicos [6]

- Materiales orgánicos

Los materiales orgánicos usados como PCM son parafinas, ácidos grasos y alcoholes con un rango de temperaturas de fusión comprendido ente 0°C a 150°C.

Estos materiales generalmente presentan una densidad menor que 1 g/cm³, es decir, menor que los materiales inorgánicos, y presentan las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- No presentan subenfriamiento durante la solidificación
- No presentan problemas de dilataciones como el hielo

Inconvenientes:

- Más caros que los inorgánicos
- Menos compactos que los inorgánicos
- Inflamables
- Baja conductividad térmica
- Cambio de fase en un rango de temperaturas en lugar de una única temperatura

Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Paraffin C14	4	165	Not available	Not available
Paraffin C15–C16	8	153	Not available	Not available
Paraffin C16–C18	20–22	152	Not available	Not available
Paraffin C18	28	244	0.148 (liquid, 40 °C), 0.358 (solid, 25 °C)	774 (liquid, 70 °C) 814 (solid, 20 °C)

Tabla 5. Propiedades físicas de algunos PCMs inorgánicos [6]

- Tipos de sistemas de almacenamiento con PCMs

Existen distintos tipos de sistemas a la hora de seleccionar un PCM, lo que influirá directamente en las especificaciones técnicas de la instalación.

- PCM encapsulado: el fluido caloportador circula alrededor las cápsulas contenedoras del PCM. La Figura 8 muestra el esquema de un depósito de almacenamiento térmico con PCM encapsulado y el detalle de una cápsula esférica de PCM.

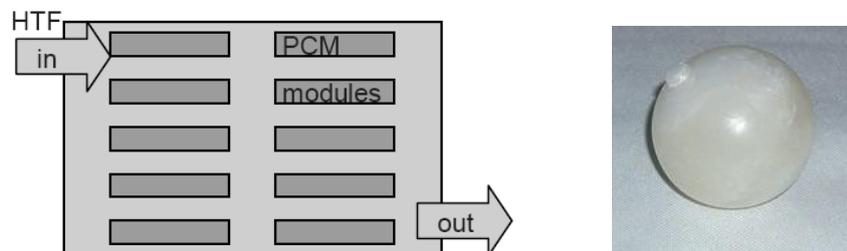


Figura 8. Depósito con cápsulas de PCM y detalle de una cápsula

- Con intercambiador de calor: el fluido caloportador circula por un intercambiador de calor sumergido en el depósito que contiene el PCM. La

Figura 9 muestra un depósito con intercambiador de calor en espiral y contracorriente. Se puede apreciar también como suceden la congelación y descongelación alrededor de los tubos del intercambiador.

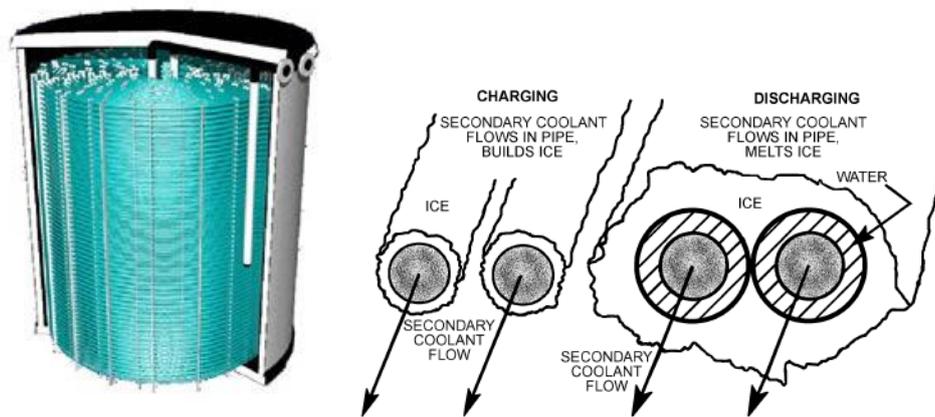


Figura 9. Depósito con intercambiador y detalle de los cambios de fase

- De contacto directo: el fluido caloportador está en contacto con el PCM, por lo que ambas sustancias han de ser inmiscibles entre sí, tal y como muestra la Figura 10.

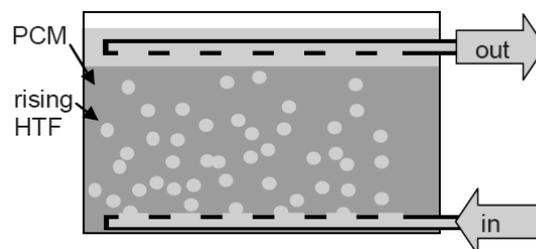


Figura 10. Depósito de PCM de contacto directo

- Máquina de hielo: se forman placas de hielo en el evaporador del chiller y se retiran para su almacenaje en un depósito cuando alcanzan un determinado grosor. La Figura 11 muestra un esquema de este tipo de almacenamiento.

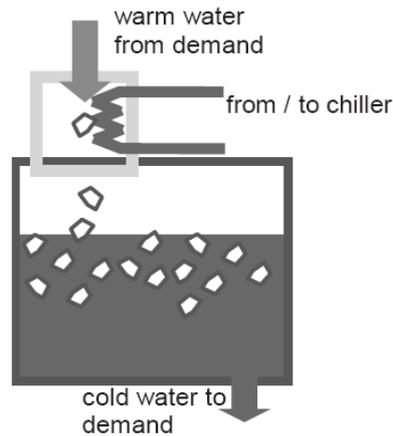


Figura 11. Depósito de PCM con máquina de hielo

- PCM slurry (Figura 12): el PCM está microencapsulado y está en suspensión en el fluido caloportador y circula con él por todo el circuito.

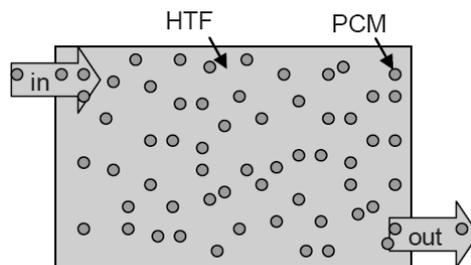


Figura 12. Depósito con PCM microencapsulado

3.4.1. Almacenamiento termoquímico

La acumulación de energía térmica en este tipo de almacenamiento se basa en una reacción físico-química reversible y en el almacenamiento de sus productos, de manera que permita recuperar cuando se desee la energía invertida para producir la reacción química, ya sea esta endotérmica o exotérmica.

Los requisitos que ha de cumplir una reacción para poder ser usada en el almacenamiento termoquímico, son que posea una entalpía de reacción alta, que sea reversible, no se degrade y tenga un bajo coste. Este sistema posee la ventaja de no tener pérdidas.

Actualmente este sistema está en fase de investigación y por tanto, mucho menos extendido que los almacenamientos sensible y latente. Pueden utilizarse tanto

reacciones sólido-gas, gas-gas como líquido-gas. Un ejemplo de ésta aplicación sería los procesos de absorción-adsorción con hidruros metálicos, tal y como muestra la Figura 13. La reacción de absorción es exotérmica, mientras que la reacción inversa es endotérmica. Dado que los productos de la reacción pueden guardarse por separado (metal e hidrógeno), es posible diseñar sistemas para producir frío o calor en una rango de temperaturas de 5°C a 130°C.

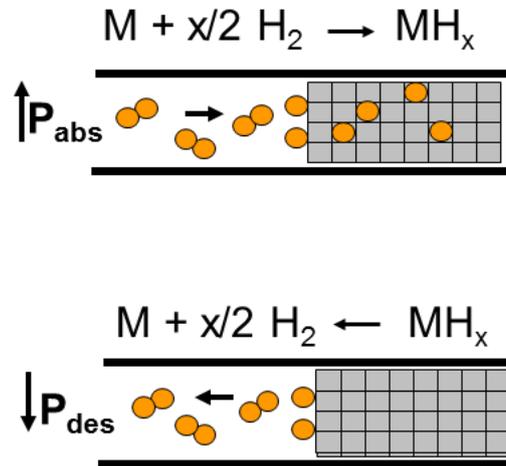


Figura 13. Procesos de absorción y adsorción en hidruros metálicos

3.5. Comparación entre tecnologías

Una vez estudiados todos los sistemas posibles de acumulación de energía térmica, resulta interesante hacer una comparación entre ellos. Como se puede apreciar en la Tabla 6, la ventaja esencial del almacenamiento latente y termoquímico frente al almacenamiento sensible reside en ser sistemas más compactos y de menor peso. Sin embargo, lo más extendido actualmente son todavía los sistemas con almacenamiento sensible (en general con agua) debido a su mayor sencillez y bajo coste.

	kJ/l	kJ/kg	Comment
<i>Sensible heat</i>			
Granite	50	17	$\Delta T = 20^\circ\text{C}$
Water	84	84	$\Delta T = 20^\circ\text{C}$
<i>Latent heat of melting</i>			
Water	330	330	0 °C
Paraffin	180	200	5–130 °C
Salthydrate	300	200	5–130 °C
Salt	600–1,500	300–700	300–800 °C
<i>Latent heat of evaporation</i>			
Water	2,452	2,450	Ambient conditions
<i>Chemical energy</i>			
H gas	11	120,000	300 K, 1 bar
H gas	2,160	120,000	300 K, 200 bar
H liquid	8,400	120,000	20 K, 1 bar
Gas (petroleum)	33,000	44,600	
<i>Electrical energy</i>			
Battery		200	Zinc/manganese oxide

Tabla 6. Comparación de tipos de almacenamiento térmico [4]

En la Tabla 7 se puede observar una comparación entre sistemas de almacenamiento sensible y latente. Como se detalla, el almacenamiento latente es más complejo que el sensible, pero permite un mayor control de la temperatura debido a que el cambio de fase se produce en una banda muy estrecha de temperatura y los sistemas resultan más compactos que los sensibles.

Por el contrario, el coste es bastante más elevado que el almacenamiento sensible, y la estabilidad a largo plazo está todavía por demostrar y depende mucho del material utilizado.

	Propiedad	A. Sensible		A. latente
		Agua	Piedra	PCM sólido-líquido
MEDIO	Rango de temperatura	Limitado	Amplio	Amplio en general
	Calor específico	Alto	Bajo	Medio
	Conductividad térmica	Baja, pero ayuda la convección	Baja	Muy baja
	Capacidad másica y volumétrica	Baja	Baja	Alta
	Estabilidad largo plazo	Buena	Buena	-
	Disponibilidad	Abundante	Abundante	Depende del material
	Coste	Barato	Barato	Caro
OTROS	Geometría intercambiador	Simple	Simple	Compleja
	Gradiente de temperatura durante carga/descarga	Grande	Grande	Pequeño
	Estratificación térmica	Existe	Existe	No existe
	Integración en una instalación	Directa con agua	Directa con aire	Indirecta
	Coste de bombas, ventiladores...	Caro	Caro	Barato
	Corrosión con materiales convencionales de construcción	No problemático	No corrosivo	-
	Ciclo de vida	Largo	Largo	Corto

Tabla 7. Comparación almacenamiento sensible y latente [8]

3.6. Estrategias de operación

A la hora de diseñar una instalación con almacenamiento térmico, se ha de tener en cuenta las distintas posibilidades de operación, tanto en la carga como en la descarga, las cuales influyen directamente en la potencia de los equipos a seleccionar.

Básicamente, existen tres estrategias de operación que se explican a continuación y cuyos perfiles de trabajo se detallan en la Figura 14:

- Sin almacenamiento: donde el equipo cubre toda la demanda y trabaja frecuentemente a cargas parciales.
- Full storage: en este tipo de operación la carga se realiza durante las horas valle y la descarga durante las horas pico. Esto implica una menor capacidad del chiller y coste de operación, pero un mayor coste de inversión.
- Partial storage: aquí la carga se da cuando no hay demanda y la descarga se realiza durante las horas de mayor demanda. Éste suele ser el sistema más rentable.

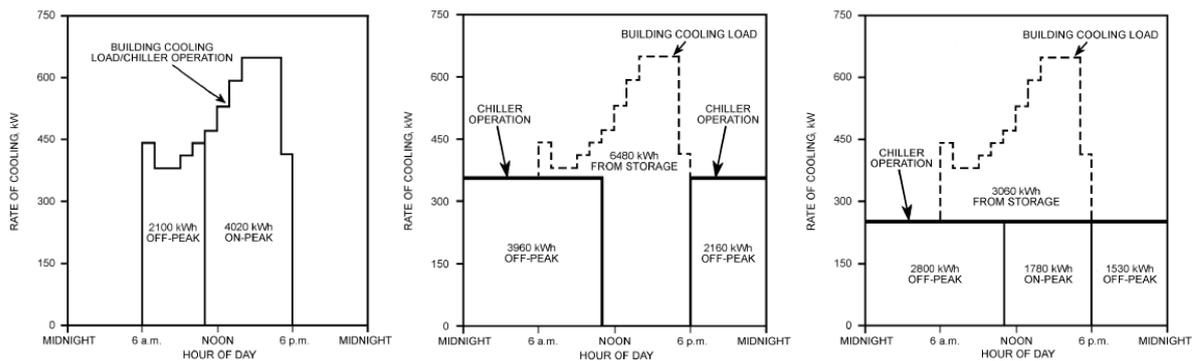


Figura 14. Operación sin almacenamiento, "full storage" y "partial storage" respectivamente [2]

Los modos de operación más comunes de almacenamiento térmico se muestran en la Tabla 8. El estudio detallado de cada caso es muy importante, pues la operación puede no ser rentable en todos los casos, habiendo que estudiar los consumos del chiller y grupos de bombeo en cada caso.

Dependiendo de la estrategia de operación, cada sistema en particular dispondrá de los modos de operación que sean necesarios. Para implementar estos modos de operación existen diversas formas de conectar las diferentes partes del circuito. En cualquier caso se pueden bypassar tanto el almacenamiento como el equipo que abastece de energía térmica. También hay que vigilar que el almacenamiento no se

descargue mientras el equipo funciona a carga parcial, ya que de esta forma se estaría desaprovechando la capacidad de ambos. Las principales formas de conexión son:

- **Conexión en serie:** el equipo y el almacenamiento se conectan uno a continuación del otro. Esta configuración permite implementar fácilmente cualquier modo de operación sin tener que cambiar el camino que sigue el fluido de trabajo. La diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida suele ser mayor que en la configuración en paralelo, de unos 8 o 9 K, para compensar la menor cantidad de fluido que es posible trasegar. Se pueden distinguir dos posibilidades de conexión en serie.
- **Depósito aguas abajo (downstream):** El equipo recibe el fluido directamente de la carga (lo más caliente/frío posible), lo que maximiza su eficiencia. Ocurre lo contrario con el almacenamiento, cuya capacidad disminuye. La temperatura de salida es más difícil de controlar, ya que viene impuesta por el almacenamiento.
- **Depósito aguas arriba (upstream):** El almacenamiento pretrata el fluido procedente de la carga. Al recibir el fluido directamente de la carga, se maximiza la capacidad del depósito. Al contrario que en el caso anterior, se consigue un buen control de la temperatura de salida pero se penaliza la eficiencia del equipo.
- **Conexión en paralelo:** El equipo y el almacenamiento se suelen conectar en paralelo cuando se renuevan instalaciones ya existentes, con una diferencia de temperaturas ya fijada. En este tipo de sistemas es más complicado implementar los distintos modos de operación, así como optimizar el reparto de la carga entre almacenamiento y equipo.

Modo de operación	Aplicación	Esquema
<p>Carga del almacenamiento</p>	<p>En momentos de demanda nula, con el fin de almacenar energía térmica.</p>	
<p>Carga del almacenamiento mientras se abastece la demanda</p>	<p>En momentos de poca demanda, con el fin de almacenar energía térmica.</p>	
<p>Abastecer la demanda sólo con el almacenamiento</p>	<p>En horas pico, para evitar consumir energía eléctrica. Sistemas <i>full storage</i>.</p>	
<p>Abastecer la demanda con el equipo y con el almacenamiento</p>	<p>En momentos de mucha demanda. Sistemas <i>partial storage</i>.</p>	
<p>Abastecer la demanda sólo con el equipo</p>	<p>En momentos en los que el equipo no necesita apoyo.</p>	

Tabla 8. Modos de operación de los almacenamientos térmicos [18]

3.7. Normativa

Tanto para el diseño y puesta a punto de los distintos sistemas que componen la instalación de almacenamiento térmico con cambio de fase, como para la realización de ensayos, se ha empleado la normativa citada a continuación. El presente apartado resume las normas empleadas para la realización del proyecto, y se citarán las normas de referencia recomendadas a seguir.

Se han resumido las normas más importantes concernientes a los distintos componentes de la instalación, mientras las normas cuyo contenido está menos ligado a la realización del presente proyecto tan solo se han citado.

La normativa está dividida en 6 secciones en función de la sección de la instalación a la que afectan:

- Normativa general de laboratorio y ensayos
- Normativa referente a circuitos frigoríficos
- Normativa referente a la seguridad
- Normativa eléctrica
- Normativa referente al instrumental de medida

3.7.1. Normativa General de Laboratorio y Ensayos.

UNE-EN ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración.

Esta norma contiene todos los requisitos que tienen que cumplir los laboratorios de ensayo y de calibración si desean demostrar que poseen un sistema de gestión, son técnicamente competentes y son capaces de generar resultados técnicamente válidos.

El uso de esta norma internacional facilitará la cooperación entre los laboratorios y otros organismos y ayudará al intercambio de información y experiencia, así como a la armonización de normas y procedimientos.

La incorporación de esta norma al proyecto sirve como referencia y para la aplicación de mejoras en la gestión del funcionamiento del laboratorio, no obstante, no se cumple íntegramente al no ser necesario para el desarrollo de todas las actividades llevadas a cabo en el laboratorio.

3.7.2. Normativa Referente a Circuitos Frigoríficos.

UNE-EN 12263:1999. Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Dispositivos interruptores de seguridad para limitar la presión. Requisitos y ensayos.

En cuanto al presente proyecto, se considera como una norma de consulta a la hora de conocer características y especificaciones de los dispositivos interruptores de seguridad para limitar la presión, ya que la realización del presente proyecto no contempla el diseño de ninguno de éstos dispositivos.

3.7.3. Normativa Referente a la Seguridad.

Este apartado de la normativa sirve de referencia en cuanto a seguridad en laboratorios, requisitos de seguridad para compresores, instalaciones eléctricas y sistemas de refrigeración.

UNE-EN 378-1,2,3,4:2008. Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Requisitos de seguridad y medioambientales.

- Parte 1: Requisitos básicos, definiciones, clasificación y criterios de elección.
- Parte 2: Diseño, fabricación, ensayos, marcado y documentación.
- Parte 3: Instalación “in-situ” y protección de las personas.
- Parte 4: Operación, mantenimiento, reparación y recuperación.

Esta norma europea se refiere a los requisitos de seguridad y medioambientales para el diseño, construcción, fabricación, instalación, funcionamiento, mantenimiento y desmantelamiento de los sistemas y equipos de refrigeración en relación con el respeto al medio ambiente local y global, pero no a la eliminación final de los refrigerantes.

El objetivo de esta norma es minimizar los posibles riesgos a las personas, bienes y al medio ambiente provenientes de los sistemas de refrigeración y refrigerantes. Estos riesgos están asociados esencialmente a las características físicas y químicas de los refrigerantes así como a las presiones y temperatura existentes en los circuitos de refrigeración.

Precauciones inadecuadas pueden dar lugar a:

- Rotura o explosión de un componente, con riesgo de proyección de materiales.
- Escape de refrigerante con riesgo de daño medioambiental o toxicidad debido a una rotura, a una fuga debida a deficiencias en el diseño, a un

funcionamiento incorrecto y a un mantenimiento, reparación, carga o desmantelamiento inadecuado.

- Inflamación o combustión del refrigerante fugado con el consecuente riesgo de incendio incluyendo el riesgo de productos tóxicos de combustión de los refrigerantes no inflamables.

UNE-EN 61010-1:2002. Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales.

Esta parte de la norma especifica los requisitos generales de seguridad para equipos eléctricos destinados a usos profesionales, procesos industriales y educativos, los cuales pueden incorporar dispositivos de cálculo. Los equipos incluidos en el campo de aplicación de la norma son los siguientes:

a) Equipos eléctricos de ensayo y de medida.

Se trata de equipos que, por medios eléctricos ensayan, miden, indican o registran una o varias magnitudes eléctricas o no eléctricas, así como, también, equipos de no medida tales como generadores de señal, patrones de medida, fuentes de alimentación, transductores, transmisores, etc.

b) Equipos eléctricos de control.

Estos equipos controlan una o varias magnitudes de salida según unos valores especificados, estando cada valor determinado por ajuste manual, por programación local o a distancia, por una o varias variables de entrada.

c) Equipos eléctricos de laboratorio.

Se trata de equipos que miden, indican, supervisan, o analizan unas sustancias, o que sirven para preparar materiales y que incluyen los equipos de diagnóstico "in Vitro" (DIV).

Estos equipos también pueden ser utilizados en otras áreas que no sean los laboratorios; por ejemplo, los equipos de DIV de auto diagnóstico que pueden ser utilizados en domicilios.

d) Accesorios diseñados para ser utilizados con los equipos anteriores (por ejemplo, los equipos diseñados para manipular las muestras).

Los requisitos de esta parte 1 de la norma tienen por objeto garantizar que el diseño y los métodos de construcción aseguran una protección adecuada para el operador y para la zona circundante contra:

- i. Choques eléctricos y quemaduras.

- ii. Peligros mecánicos.
- iii. Temperaturas excesivas.
- iv. Propagación del fuego originado en los equipos.
- v. Efectos de los líquidos y fluidos bajo presión.
- vi. Efectos de las radiaciones, incluyendo fuentes láser y de la presión acústica y ultrasónica.
- vii. Emisiones de gas, explosiones e implosiones.

3.7.4. Normativa Eléctrica.

UNE 20460-1:2003. Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 1: Campo de aplicación, objeto y principios fundamentales.

Esta norma enumera las reglas de diseño y de realización de las instalaciones eléctricas con el fin de garantizar la seguridad y su funcionamiento de forma satisfactoria, teniendo en cuenta la aplicación de la instalación.

En esta norma se dan reglas de protección para garantizar la seguridad en los siguientes aspectos:

- Protección contra los choques eléctricos. Se dan métodos de protección a personas y animales contra choques eléctricos producidos tanto por contacto directo como por contacto indirecto
- Protección contra los efectos térmicos. Se deben excluir riesgos de ignición, además de proteger a personas y animales contra riesgo de quemadura
- Protección contra sobreintensidades. Las personas, los animales y los bienes deben estar protegidos contra los daños debidos a temperaturas excesivas o los esfuerzos electromecánicos causados por las sobreintensidades capaces de producirse en los conductores activos.
- Protección contra corrientes de defecto. Los conductores que no sean los conductores activos, y las demás partes destinadas a la evacuación de las corrientes de defecto deben ser capaces de poder soportar estas corrientes sin alcanzar temperaturas demasiado elevadas.
- Protección contra sobretensiones. Las personas, animales y bienes deben estar protegidas contra sobretensiones producidas tanto por defecto de aislantes de conductores activos de circuitos alimentados a tensiones diferentes, como debidas a otras causas (fenómenos atmosféricos, sobretensiones de maniobra, etc.).

A fin de cumplir estos requisitos de seguridad, en esta norma, se dan indicaciones de diseño de las instalaciones eléctricas, de elección de los equipos eléctricos y de realización de las instalaciones eléctricas y su puesta en servicio.

UNE 20460-3:1996. Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 3: determinación de las características generales.

Esta parte de la norma tiene como objeto la determinación de las características de la instalación de acuerdo con los siguientes capítulos:

- La utilización prevista de la instalación, su estructura general y sus alimentaciones.
- Las influencias externas a las que la instalación está sometida.
- La compatibilidad de sus materiales.
- Su mantenibilidad.

Deberán tomarse en consideración estas características para la elección de las medidas de protección para garantizar la seguridad y la elección e instalación de los materiales eléctricos.

UNE 15771:2006. Criterios generales para la elaboración de proyectos de instalaciones eléctricas de baja tensión.

Esta norma tiene por objeto establecer las consideraciones generales que permitan precisar las características que deben satisfacer los proyectos de instalaciones eléctricas de baja tensión.

3.7.5. Normativa de Instrumental de Medida.

UNE-EN 60584-1:1997. Termopares. Parte 1: Tablas de referencia.

Esta norma internacional proporciona tablas de referencia para ser empleadas en la conversión de las fuerzas electromotrices de los termopares en sus temperaturas medias equivalentes y viceversa.

Las ecuaciones polinomiales de las que provienen las tablas se incluyen en el anexo A de la norma, por lo que no se dan tolerancias. Las tablas de referencia ($E = f(t)$) se derivan de las funciones de referencia respectivas y las tablas inversas ($t = f(E)$) de las funciones inversas respectivas.

UNE-EN 60584-2:1996. Termopares. Parte 2: Tolerancias.

Esta norma contiene las tolerancias de fabricación para los termopares de metales preciosos y metales comunes de acuerdo con las tablas de referencia f.e.m./Temperatura de la Norma CEI 584-1. Los valores de las tolerancias

corresponden a las de los termopares fabricados a partir de hilos cuyos diámetros están normalmente comprendidos entre 0,25mm y 3mm, tal como se suministran al usuario. Estos valores no indican la desviación del calibrado durante la utilización.

UNE-EN 60751:1996. Sondas industriales de resistencia termométrica de platino.

Esta norma especifica los requisitos que deben cumplir los termómetros industriales con resistencia de platino cuya resistencia eléctrica corresponde a una función definida de la temperatura. La norma cubre los termómetros utilizables para toda o parte de la gama de temperaturas de -200°C hasta +850°C con dos clases de tolerancias. Se refiere esencialmente a elementos con revestimiento que pueden sumergirse en el medio cuya temperatura debe medirse.

También se describen en ella métodos de ensayo para comprobar la conformidad con esta norma y equipos que permiten realizar algunos ensayos.

Se ha revisado el estado del arte en almacenamiento térmico y se ha profundizado en los almacenamientos activos con PCMs, el tema ha desarrollado por el grupo de trabajo de PCMs.

Se ha revisado la normativa a aplicar en la fase de diseño de la instalación. En este sentido, es importante diseñarla correctamente tanto la instalación como su estrategia de operación, pues de lo contrario podría no resultar rentable.

4. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

4.1. Diseño general del circuito

La instalación ha sido diseñada buscando un punto de encuentro entre las especificaciones técnicas del depósito CALMAC, las limitaciones físicas del laboratorio del Instituto de Ingeniería Energética y de las instalaciones del propio edificio, y las características de los ensayos a realizar, tanto con el depósito de CALMAC como con el diseñado en el futuro por el IIE.

El diseño consta de un circuito primario que está conectado al depósito de almacenamiento térmico y de dos circuitos secundarios, los cuales enfrían o calientan el fluido caloportador del circuito primario. Ambos focos frío y caliente pueden ser anulados en los ensayos por medio de su correspondiente bypass, tal y como se refleja en la Figura 15 donde se ha representado el esquema definitivo de la instalación.

Al mismo tiempo, también existen otros lazos de recirculación en el circuito primario que sirven para invertir el sentido de circulación del refrigerante. Estos lazos serán usados con el depósito COMPACTO en un tipo de ensayos descritos más adelante en este documento, llamados “upstream” y “downstream”.

Adicionalmente, el circuito primario también está dotado de sistemas de medición (manómetros, coriolis y termopares), tanto para control de los ensayos como para la adquisición de datos. Los sistemas de medición se dispondrán estratégicamente en diferentes puntos del circuito primario y del depósito de almacenamiento térmico.

A continuación se describen en detalle los principales componentes de la instalación, prestando especial atención a las características técnicas y también a algunos datos proporcionados por el fabricante.

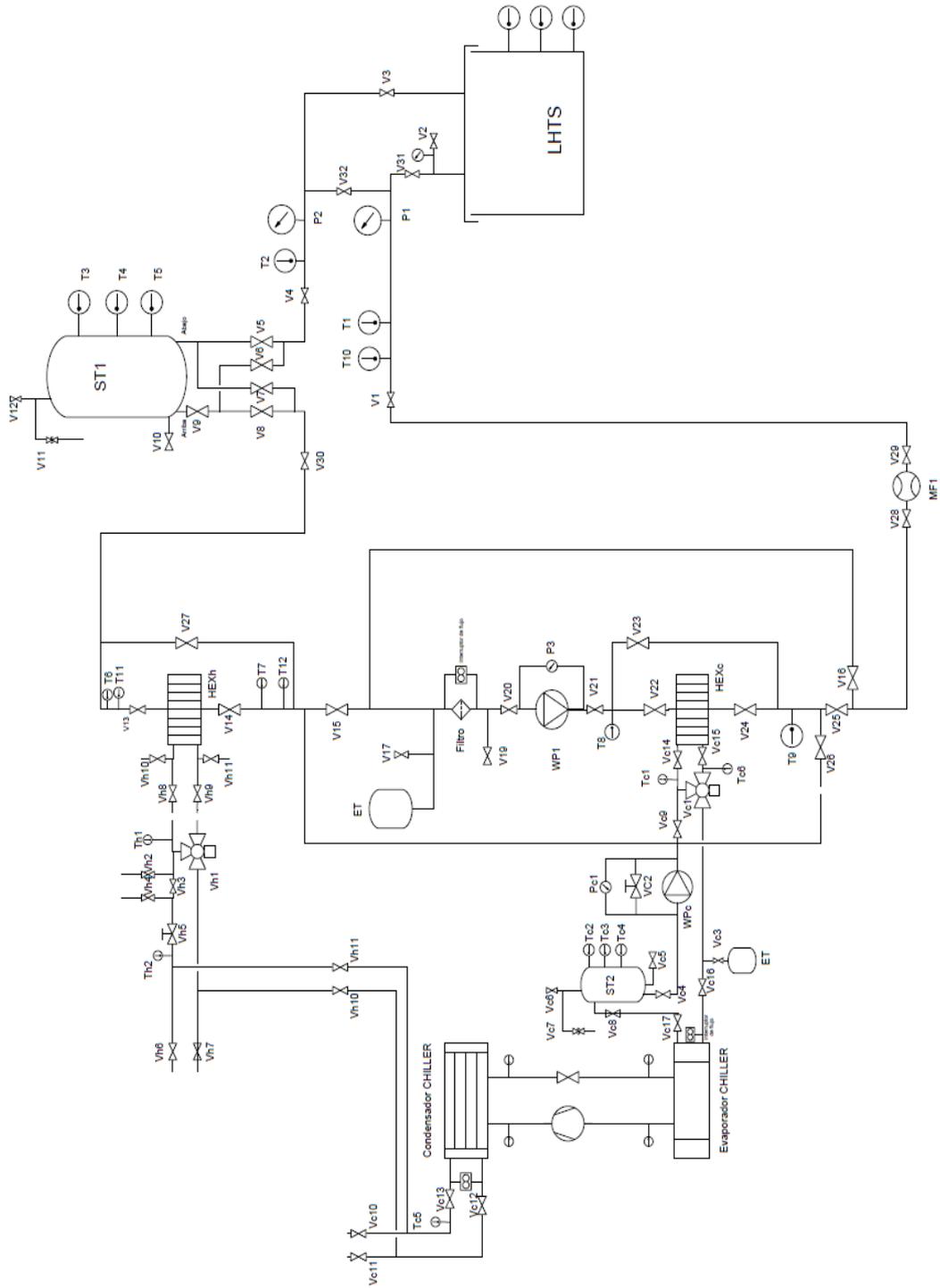


Figura 15. Esquema hidráulico de la instalación PCM

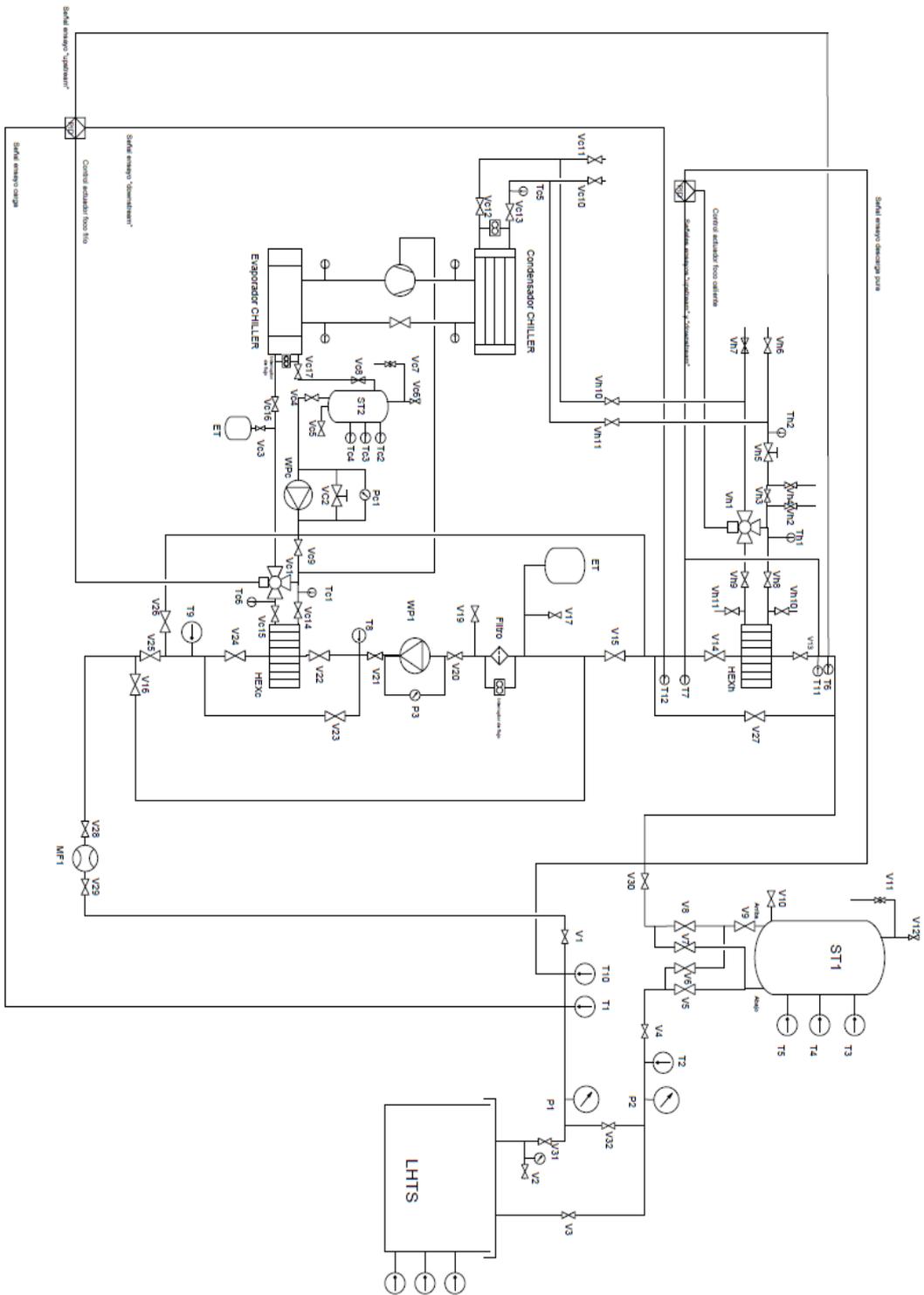


Figura 16. Esquemas hidráulico y de control de la instalación PCM

4.2. Tuberías

En primer lugar se ha calculado el diámetro de las tuberías de manera que las pérdidas de carga en la instalación sean bajas, pero sin elevar demasiado el coste de la ésta. El material seleccionado para el montaje del circuito ha sido el cobre, debido a la versatilidad que ofrece para éste tipo de instalaciones de pequeña potencia y a la experiencia del personal de laboratorio en instalaciones similares.

Como se puede comprobar en la DOCUMENTACIÓN, el depósito de CALMAC ICEBANK puede trabajar con caudales superiores a los 4 m³/h, pero sin embargo no se alcanzará nunca el valor de este caudal debido a la limitación de potencia del chiller y a la bomba seleccionada en consecuencia.

Los ensayos a realizar están comprendidos entre 1,5 y 4 m³/h, por lo que se ha seleccionado un diámetro de tubería tal que la velocidad del fluido en su interior sea cercana a 1 m/s en la mayoría de los ensayos.

En la Tabla 9 se ha calculado para cada caudal el diámetro teórico que proporciona una velocidad lineal del fluido de 1 m/s, y se ha calculado también la velocidad del fluido en las secciones de los tubos comerciales de diámetro más cercano al diámetro teórico. Como se puede comprobar, con el tubo de 35 mm en la mayoría de los caudales a ensayar la velocidad del fluido caloportador es cercana o inferior a la unidad, por lo que se ha seleccionado éste en lugar del diámetro superior.

Caudal (m ³ /h)	D _t (mm)	D _n (mm)	D _i (mm)	S (m ²)	V (m/s)
4	37.61	42	40.8	1.31E-03	0.8499
4	37.61	35	33.8	8.97E-04	1.2383
3.5	35.18	35	33.8	8.97E-04	1.0835
3	32.57	35	33.8	8.97E-04	0.9287
2.5	29.74	35	33.8	8.97E-04	0.7740
1.5	23.03	35	33.8	8.97E-04	0.4644

Tabla 9. Cálculo de la sección de la tubería

Con lo que respecta a las uniones de los tubos y accesorios de la instalación, es importante seleccionar el material de aporte adecuado en función de las condiciones de trabajo a las que se estará sometido. El material de aporte es una aleación formada por varios metales que se emplea para unir tubo y accesorio asegurando la estanqueidad del sistema.

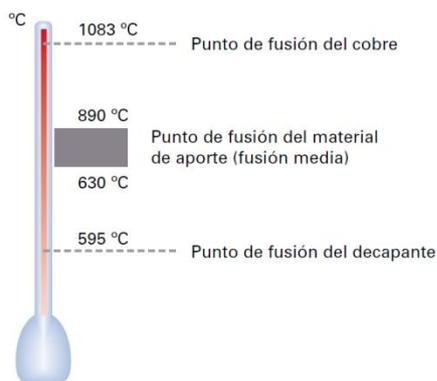


Figura 17. Intervalo de temperaturas de fusión medias recomendadas [19]

Debido al amplio rango de temperaturas de trabajo de la instalación, se ha seleccionado un material de aporte para soldadura fuerte, recomendada cuando las uniones soldadas deben soportar grandes esfuerzos mecánicos. La Tabla 10 resume la composición del material de aporte seleccionado y la temperatura de fusión media de la aleación.

Material de aporte	T fusión media (°C)	%Cu	%Ag	%P
AG-5P	650	89	5	6

Tabla 10. Composición del material de aporte seleccionado

4.3. Aislamiento

Con el fin de reducir las pérdidas térmicas en la instalación y evitar la formación de condensaciones de la humedad del ambiente, se ha de seleccionar un material aislante con el espesor adecuado. El material seleccionado es una espuma elastomérica y el montaje se ha realizado una vez la instalación hidráulica ha sido terminada y probada su estanqueidad. La Figura 18 muestra un croquis de la sección de tubo con el aislante.

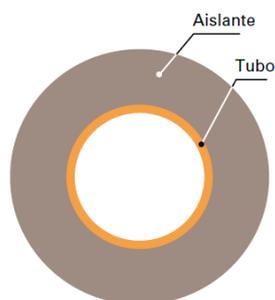


Figura 18. Croquis de la sección de un tubo aislado [19]

Para la selección del espesor mínimo de aislante, se han seguido las recomendaciones del RITE para el aislamiento de tuberías en instalaciones térmicas. Las Tablas Tabla 11 y Tabla 12 muestran los espesores mínimos para tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes y fríos por el interior de edificios, respectivamente.

Diámetro exterior (mm)	Temperatura máxima del fluido (°C)			
	40 ... 60	> 60 ... 100	>100 ... 180	ACS*
$D \leq 35$	25	25	30	30
$35 < D \leq 60$	30	30	40	35
$60 < D \leq 90$	30	30	40	35
$90 < D \leq 140$	30	40	50	35
$140 < D$	35	40	50	40

Tabla 11. Aislamiento mínimo (mm) para tuberías con fluidos calientes [19]

Diámetro exterior (mm)	Temperatura máxima del fluido (°C)		
	$>-10 \dots 0$	$>0 \dots 10$	>10
$D \leq 35$	30	20	20
$35 < D \leq 60$	40	30	20
$60 < D \leq 90$	40	30	30
$90 < D \leq 140$	50	40	30
$140 < D$	50	40	30

Tabla 12. Aislamiento mínimo (mm) para tuberías con fluidos fríos [19]

Como se ha explicado anteriormente, la tubería seleccionada para la instalación ha sido la de 35 mm, y al estar comprendidos los ensayos a realizar entre -10°C y 100°C , se ha escogido como espesor del aislante de las tuberías y accesorios el correspondiente a las condiciones más restrictivas, esto es 30 mm.

4.4. Válvulas proporcionales y actuadores

Para controlar la temperatura de entrada al depósito CALMAC durante los ensayos de carga y descarga, se han seleccionado una válvula y un actuador proporcionales antes de cada intercambiador del foco frío y caliente, tal y como se puede comprobar en el ESQUEMA de la instalación.

Las válvulas seleccionadas son el modelo VXG 40.41 de SIEMENS, mostrada en la Figura 19, y los actuadores son el modelo SKD 62UA, también de SIEMENS.



Figura 19. Válvula de tres vías proporcional VXG.40.41 de SIEMENS

La Figura 20 muestra el conjunto de válvula más actuador y el principio de funcionamiento. Cada actuador recibe la señal del correspondiente PID, según el tipo de ensayo, como se explica más adelante.

El actuador, dependiendo de si el controlador ha ordenado abrir o cerrar el paso de la válvula de tres vías, activará la bomba de aceite o abrirá la válvula de recirculación respectivamente, para mover el vástago de la válvula según corresponda.

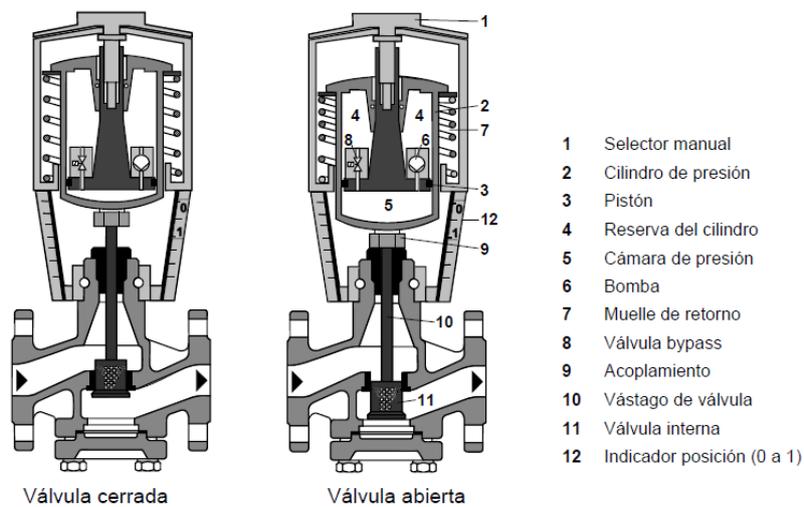


Figura 20. Esquema del funcionamiento de la válvula proporcional

Adicionalmente, como el fluido que circula por la válvula proporcional del foco frío se encuentra en la mayoría de los casos por debajo de 0°C, es recomendable montar el calefactor de vástago ASZ 6.5 de SIEMENS que muestra la Figura 21, para así evitar que la humedad del ambiente se congele sobre la superficie del vástago e impida su correcto funcionamiento.

**Calefactor de vástago
ASZ6.5**

- Para medios bajo 0°C
- Montar entre válvula y actuador

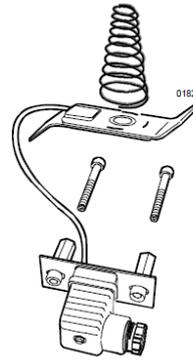


Figura 21. Calefactor para el vástago de la válvula del foco frío

4.5. Intercambiadores de calor

Para los intercambiadores de calor se ha escogido el fabricante SWEP y se han seleccionado utilizando el SWEP Software Package G7 (SSP), que se trata de un software desarrollado para realizar cálculos avanzados de intercambiadores de calor, con lo que permite seleccionar el intercambiador que mejor se adapta a la instalación.

La Figura 22 muestra la interfaz del SSP durante uno de los cálculos de la fase de diseño de la instalación, el cual requiere como inputs los datos relativos al fluido utilizado y las condiciones de temperatura/caudal deseadas.

Design
 Performance
 Rating

Fluid Side 1: Ethanol - Water (Eth) 25%
 Fluid Side 2: Ethanol - Water (Eth) 25%

CoCurrent
 Exchangers: B-Types

Side 1 Side 2

Heatload: 17.00 kW

Inlet temperature: -12.00 °C °C
 Outlet temperature: °C -10.00 °C

Flow: 1.250 kg/s 0.7200 kg/s
 Max pressure drop: 50.0 kPa 50.0 kPa

Number of passes:
 Number of plates:
 Oversurfacing: %
 Fouling factor: m²·°C/kW

Allow port switch
 AutoPerformance

BPHE	OS (%)	DP2 (kPa)	PF Rating
B25T x50	0	17.70	<div style="width: 100%;"></div>
B10T /2Px81	10	17.80	<div style="width: 90%;"></div>
B28x66	-1	8.12	<div style="width: 80%;"></div>
2 B15x60	-1	7.27	<div style="width: 70%;"></div>
2 B12H /2Px77	0	8.04	<div style="width: 60%;"></div>
5 B5/4Px57	11	17.70	<div style="width: 50%;"></div>

Heatexchanger : B25Tx50H/1P

DUTY REQUIREMENTS	Unit	Side 1	Side 2
Heat load	kW	17.00	
Inlet temperature	°C	-12.00	-4.49
Outlet temperature	°C	-8.82	-10.00
Flow rate	kg/s	1.250	0.7200
Max. pressure drop	kPa	50.0	50.0
Thermal length		1.05	1.83

PLATE HEAT EXCHANGER	Unit	Side 1	Side 2
Total heat transfer area	m ²	3.02	
Heat flux	kW/m ²	5.62	
Mean temperature difference	K	3.02	
Pressure drop - total	kPa	43.1	17.7
- in ports	kPa	3.72	1.23
Port diameter	mm	24.0	24.0
Number of channels		25	24
Number of plates		50	
Oversurfacing	%	0	
Fouling factor	m ² ·°C/kW	-0.001	
H.T.C. (available/required)	W/m ² ·°C	1860 - 1860	

Figura 22. Interfaz del SWEP Software Package

Finalmente los intercambiadores seleccionados tras los cálculos han sido el SWEP B25T*60H/1P de 60 placas para el foco frío, y el SWEP B10TH*40 de 40 placas para el foco caliente. La Figura 23 muestra en detalle el croquis del intercambiador del foco frío.

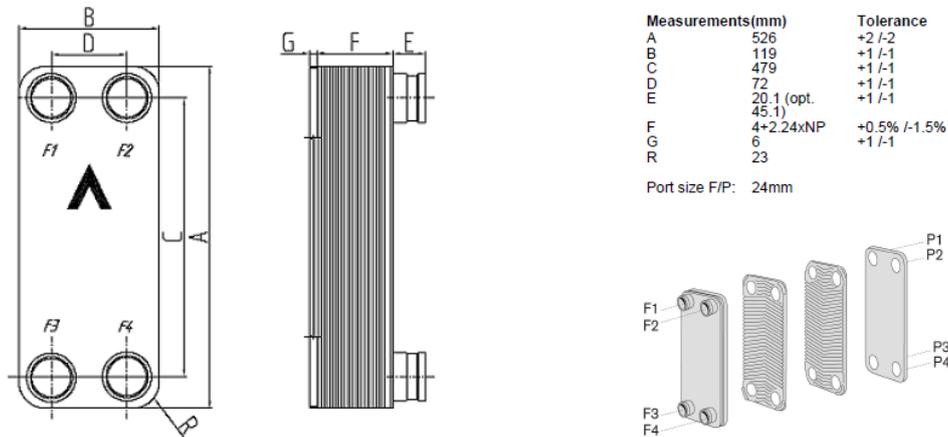


Figura 23. Croquis intercambiador B25T

4.6. Depósitos de inercia

Como se ha descrito anteriormente, para mantener la temperatura de entrada constante en el depósito de CALMAC ICEBANK, es necesario compensar el pico inicial de potencia demandada al principio de los procesos de carga y descarga. Por ello se ha instalado un depósito de inercia de 1000 l (ST1) cuyo objetivo es amortiguar las variaciones de temperatura provocadas por el depósito de CALMAC al inicio de los ensayos.

Al igual que otros elementos de la instalación, este depósito dispone de un bypass que permite anularlo cuando los ensayos lo requieran (al reducir la inercia térmica del circuito principal, se puede reducir el tiempo de cada ensayo de carga/descarga en aproximadamente 3 horas). Además del bypass, este depósito posee un juego de válvulas que permiten introducir el agua por su entrada inferior o superior para evitar siempre la estratificación de temperaturas en su interior independientemente del tipo de ensayo, bien sea carga o descarga.

Para el diseño de éste depósito se ha utilizado la ecuación [1], donde se ha tenido en cuenta que los ensayos se realizarán con un caudal promedio de 3 m³/h y que la pendiente $\frac{dT}{dt}$ típicamente toma un valor de 1 °C/minuto en éste tipo de instalaciones.

La variable M es la masa de inercia requerida en el sistema para mantener dicha pendiente cuando se introduce el agua a una temperatura T estando todo el tanque a una temperatura T_i, donde se han tomado los valores de -8°C y 18°C respectivamente.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{m}}{M}(T - T_i) \quad [1]$$

Finalmente se ha obtenido un valor de 900 l para el depósito de inercia del circuito primario, por lo que se ha seleccionado el de 1000 l por ser éste el volumen comercial inmediatamente superior.

Igualmente, la instalación también consta de un depósito de capacidad inferior (300 l) ubicado en el circuito secundario del chiller. Su función es la misma que en otras instalaciones de climatización y sirve para amortiguar las variaciones de temperatura de este circuito y por tanto, para evitar tener continuamente arranques y paradas del compresor del chiller, con lo que se alarga la vida útil del compresor.

El depósito de inercia de 300 l del circuito secundario podría ir colocado tanto antes como después del evaporador del chiller. La primera opción se utiliza para proteger el compresor del chiller ante las variaciones de la temperatura de retorno producidas por el control de la recirculación. La otra opción se utiliza para garantizar una temperatura constante en el punto de consumo, por lo que se ha elegido ésta configuración.

Para el diseño de éste depósito de inercia se ha utilizado la ecuación [2], donde q es la potencia del chiller, Δt_{OFF} es el lapso de tiempo deseado entre parada y arranque del compresor, C_p es el calor específico de la mezcla de agua-glicol del circuito secundario y ΔT es el salto de temperaturas que debe soportar la masa de inercia durante el tiempo que el compresor está parado.

$$M > \frac{q\Delta t_{OFF}}{C_p\Delta T} \quad [2]$$

Tomando 17 kW, 2 minutos, 3.64 kJ/kgK y 2°C respectivamente, se obtiene un valor de 280 l para el depósito de inercia del circuito secundario, por lo que se ha seleccionado el de 300 l por ser éste el volumen comercial inmediatamente superior. La Figura 24 muestra este depósito de inercia ya instalado en el circuito del chiller.

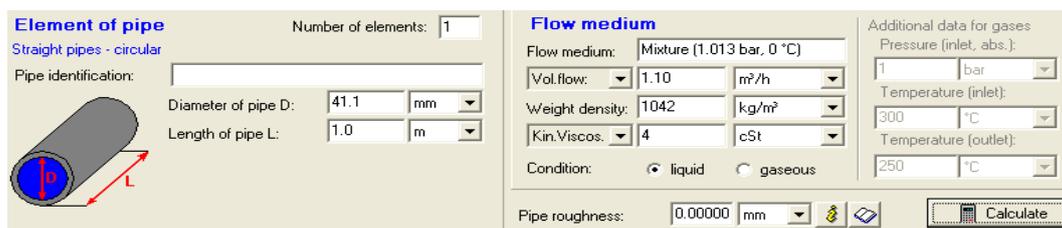


Figura 24. Depósito de inercia del circuito secundario

4.7. Bombas

El sistema de bombeo consta de dos bombas, una en el circuito primario y otra de menor tamaño en el circuito secundario. Las bombas se han seleccionado calculando la altura resistiva de la instalación, estimando el número de codos y sabiendo el número de válvulas e intercambiadores presentes en el circuito hidráulico.

Para los cálculos de la curva resistiva se ha utilizado el software SF Pressure Drop, que permite calcular las pérdidas hidráulicas de cada elemento de la instalación en función del caudal y del tipo de fluido que circula a través de él. La Figura 25 muestra una captura de pantalla de este programa durante los cálculos de la caída de presión producida en la tubería.



The screenshot shows the 'Element of pipe' and 'Flow medium' sections of the SF Pressure Drop software. The 'Element of pipe' section includes a diagram of a pipe with diameter 'D' and length 'L', and input fields for 'Diameter of pipe D' (41.1 mm) and 'Length of pipe L' (1.0 m). The 'Flow medium' section includes fields for 'Flow medium' (Mixture (1.013 bar, 0 °C)), 'Vol. flow' (1.10 m³/h), 'Weight density' (1042 kg/m³), and 'Kin. Viscos.' (4 cSt). The 'Additional data for gases' section includes fields for 'Pressure (inlet, abs.)' (1 bar), 'Temperature (inlet)' (300 °C), and 'Temperature (outlet)' (250 °C). The 'Condition' is set to 'liquid'. The 'Pipe roughness' is set to 0.00000 mm. A 'Calculate' button is visible at the bottom right.

Figura 25. Interfaz del programa SF Pressure Drop

Para la bomba del circuito primario se ha elegido el fabricante Grundfos, y en particular su modelo CRE 5-5 con una potencia eléctrica de 0,75 kW. Se trata de una bomba de eje vertical tal y como ilustra la Figura 26.

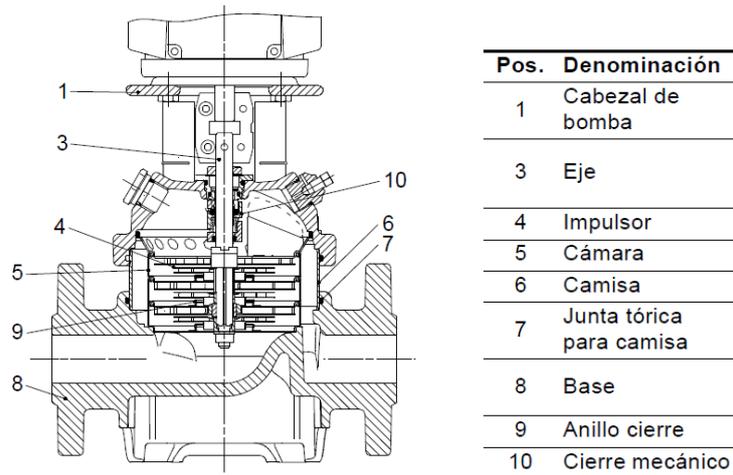


Figura 26. Sección de la bomba CRE 5-5

La bomba CRE 5-5 es de velocidad variable, lo que permite ajustar el caudal según el ensayo a realizar. La Figura 27 muestra las diferentes curvas de altura motriz de la bomba en función de la velocidad de giro seleccionada.

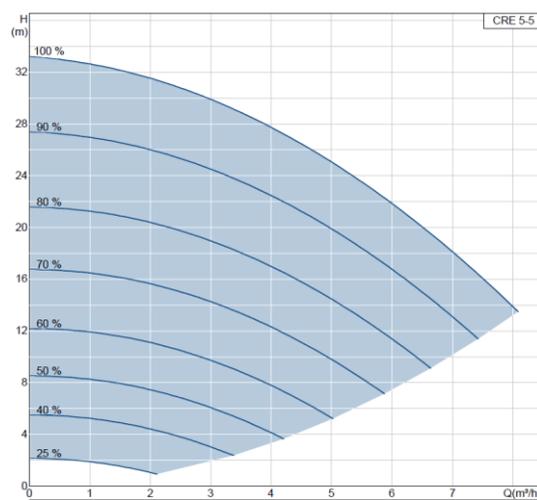


Figura 27. Curvas de altura motriz de la bomba CRE 5-5

Por otro lado, la bomba seleccionada para trasegar el fluido caloportador del circuito secundario es la CH4-50 de Grundfos. La Figura 28 muestra el esquema de esta bomba y su curva motriz junto con la de otros modelos similares.

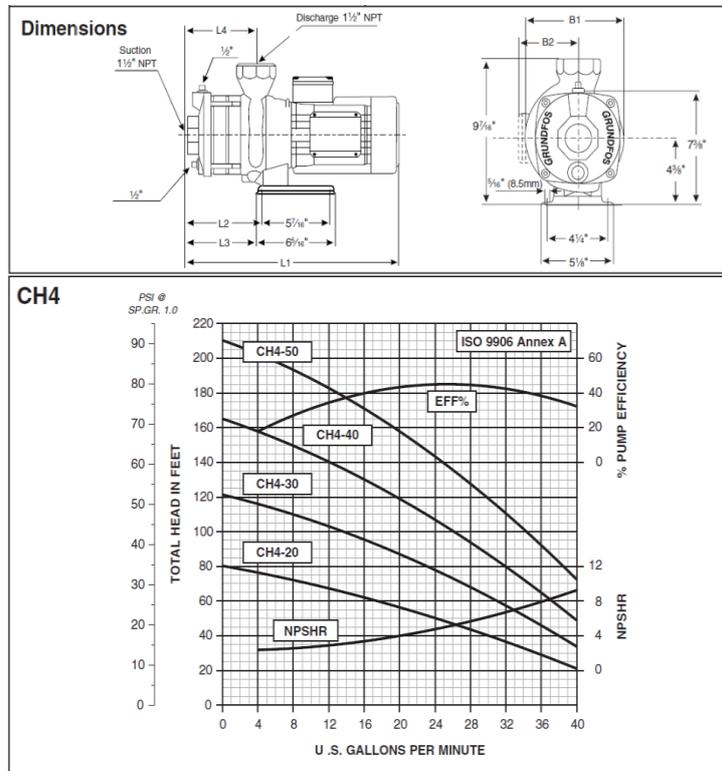


Figura 28. Esquema y curvas de la bomba CH4-40

4.8. Llenado con glicol

Debido a las bajas temperaturas a las que se ha de trabajar durante los ensayos, es necesario añadir un anticongelante a los fluidos caloportadores de los circuitos primario y secundario. La Tabla 13 muestra las características físicas de distintas disoluciones en función de la concentración de monoetilenglicol.

Wt % Ethylene Glycol	Vol % Ethylene Glycol	Wt % DOWTHERM SR-1	Vol % DOWTHERM SR-1	Freezing Point °F	Boiling Point °F @ 760 mm Hg	Degree Brix ¹⁷	Refractive Index 22°C
0.0	0.0	0.0	0.0	32.0	212	0.0	1.3328
5.0	4.4	5.2	4.6	29.4	213	3.8	1.3378
10.0	8.9	10.5	9.3	26.2	214	6.8	1.3428
15.0	13.6	15.7	14.2	22.2	215	9.9	1.3478
20.0	18.1	20.9	19.0	17.9	216	13.0	1.3530
21.0	19.2	22.0	20.1	16.8	216	13.7	1.3540
22.0	20.1	23.0	21.0	15.9	216	14.3	1.3551
23.0	21.0	24.1	22.0	14.9	217	14.8	1.3561
24.0	22.0	25.1	23.0	13.7	217	15.5	1.3572
25.0	22.9	26.2	24.0	12.7	218	16.1	1.3582
26.0	23.9	27.2	25.0	11.4	218	16.7	1.3593
27.0	24.8	28.3	26.0	10.4	218	17.3	1.3603
28.0	25.8	29.3	27.0	9.2	219	17.9	1.3614
29.0	26.7	30.4	28.0	8.0	219	18.6	1.3624
30.0	27.7	31.4	29.0	6.7	220	19.2	1.3635
31.0	28.7	32.5	30.2	5.4	220	19.8	1.3646
32.0	29.6	33.5	31.0	4.2	220	20.4	1.3656
33.0	30.6	34.6	32.0	2.9	220	21.0	1.3667
34.0	31.6	35.6	33.1	1.4	220	21.7	1.3678
35.0	32.6	36.6	34.1	-0.2	221	22.3	1.3688

Tabla 13. Características físicas en función de la concentración de glicol [20]

Las concentraciones volumétricas de monoetilenglicol seleccionadas para los circuitos primario y secundario son de 23 y 30%, respectivamente. Lo que se traduce en 320l de monoetilenglicol y al secundario 100 l y el resto del volumen de cada circuito se ha completado con agua de red.

4.9. Vasos de expansión

Debido al amplio rango de temperaturas y por tanto a las variaciones de densidad al que estará sometido el fluido caloportador, es necesario que tanto el circuito primario como el del foco frío dispongan de un vaso de expansión. Los vasos de expansión se han colocado en la aspiración de la bomba de cada circuito para compensar las variaciones de presión que pueden aparecer durante los transitorios y evitar así una posible cavitación.

Para el cálculo del vaso de expansión del circuito primario se ha considerado la masa total agua-glicol encerrada en la instalación, y se ha calculado la variación de volumen a partir de su variación de densidad con la temperatura.

La masa total del circuito primario teniendo en cuenta todos los elementos es 1265 kg de agua-glicol al 23% en volumen, y teniendo en cuenta que los ensayos con el depósito CALMAC estarán comprendidos entre -10°C y 20°C, la variación de volumen asociada es de 9.3 l. Sin embargo, como se ha explicado con anterioridad, con el depósito COMPACTO se realizarán pruebas comprendidas entre -10°C y 95°C, lo que aumenta el volumen de expansión hasta 54.2 l.

Por este motivo, se ha seleccionado un vaso de expansión de 33 l para el circuito primario, y como se puede comprobar en la Figura 15, se ha dejado preparada una toma para una futura ampliación del volumen de expansión de la instalación.

Por otro lado, la masa total del circuito secundario es de 348 kg de agua-glicol al 30% en volumen, y teniendo en cuenta que el chiller funcionará entre -10°C y 20°C , la variación de volumen será de 3 l, pero por seguridad se ha seleccionado un vaso de expansión de 18 l. La Figura 29 muestra los vasos de expansión de los circuitos primario y secundario de la instalación.



Figura 29. Vasos de expansión del circuito primario y secundario

4.10. Cuadro eléctrico principal

Es el cuadro eléctrico encargado de la maniobra y seguridad de la instalación y proporciona una interfaz entre el sistema de control de la instalación y el técnico encargado de manipular la misma. En él se han implementado los algoritmos lógicos que hacen que se cumplan las condiciones de maniobra y seguridad de los distintos componentes de la instalación. También concentra los dispositivos encargados de proteger los componentes de la instalación contra sobrecargas y sobretensiones así como los dispositivos encargados de proteger a los usuarios de la misma contra derivaciones. El esquema eléctrico del cuadro eléctrico principal se puede consultar en los ANEXOS.

El objetivo de la parte de maniobra es poder arrancar y parar los distintos componentes de la instalación. Los cuales son:

- Bomba del circuito primario
- Bomba del circuito secundario
- Compresor del chiller
- Actuador de la válvula proporcional del foco frío
- Actuador de la válvula proporcional del foco caliente

El compresor es el componente más delicado de la instalación, por lo que su operación debe estar controlada para evitar condiciones de riesgo. Para cumplir estas

condiciones se ha diseñado una cadena lógica de seguridad que se debe cumplir para que el compresor del chiller pueda arrancar.

Los parámetros que componen la cadena de seguridad son:

- 1- Flujo de agua en el circuito principal.
- 2- Flujo de agua en el circuito secundario del chiller.
- 3- Flujo de agua en el condensador del chiller.
- 4- Presión de la parte de alta.
- 5- Presión de la parte de baja.

El agua debe de estar circulando tanto en el circuito principal como en el secundario durante 40 segundos para cumplir las condiciones 1 y 2. Esto es, además de una medida de protección para el compresor también para las propias bombas, puesto que de esta manera se evita que trabajen en vacío o en seco en caso de fallo en la instalación. Esto se implementa mediante un flujostato de presión diferencial situado en la entrada y salida del filtro en el caso del circuito principal y del evaporador en el caso del secundario.

La Figura 30 muestra un detalle del cuadro eléctrico donde se encuentran los selectores de maniobra de ambas bombas y del chiller. Al mismo tiempo existen pilotos verdes para indicar que el dispositivo se encuentra funcionando, y rojo para señalar que el dispositivo se ha parado por algún motivo.

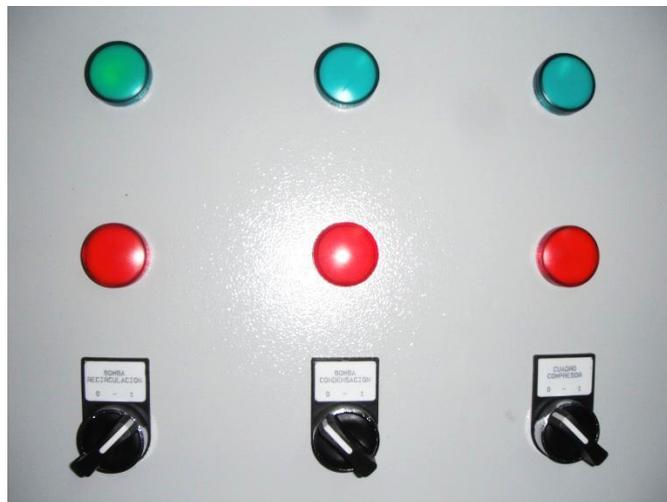


Figura 30. Selectores de maniobra de las bombas y del chiller

Igualmente, debe de haber flujo de agua de condensación en el condensador del chiller para asegurar que se disipa correctamente el calor durante su operación. En este caso, el flujostato se encuentra conectado a la entrada y salida del condensador del chiller.

Los flujostatos utilizados son de la serie SFS de Meccanica Tovo, tal y como muestra la Figura 31. El principio de funcionamiento del dispositivo para detectar si existe flujo se basa en instalar una toma del presostato diferencial aguas arriba de un elemento de la instalación que genere una pérdida de carga y la otra aguas abajo. De esta manera, al producirse una presión diferencial se desplaza la membrana del flujostato y cierra el circuito eléctrico, con lo que se detecta que existe caudal en la instalación.



Figura 31. Flujostato diferencial SFS

Por otro lado, la presión del gas en el circuito frigorífico debe estar dentro de unos límites y esto se vigila con dos presostatos, uno de alta y otro de baja. El presostato de alta está situado en la línea de alta y se han tarado a una presión de condensación de 25 bar. El presostato de baja está situado en el tramo de succión del compresor y se dispara en caso de que la presión descienda por debajo de la presión de tarado, en este caso 1 bar.

Si cualquier condición de la cadena de seguridad explicada anteriormente falla, se desconecta instantáneamente el chiller y se muestra la correspondiente alarma que ha provocado el fallo. En caso de fallo por alta o baja presión, se abre la cadena de seguridad y se para el chiller, pero no existe un rearme automático sino manual a diferencia de las instalaciones comerciales, evitando de esta manera que el compresor esté intentando trabajar bajo las condiciones que han activado la alarma.

En la Figura 32 se puede observar el sector del cuadro eléctrico destinado a mostrar el tipo de fallo que ha sucedido, tanto para los tres flujostatos como para los dos presostatos. Igualmente, también muestra el botón de rearme manual de éstos.

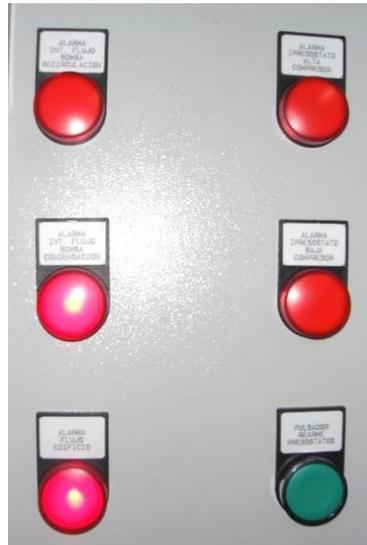


Figura 32. Alarmas de los flujostatos y presostatos

4.11. Sistema de adquisición de datos

Para adquirir los datos de los ensayos se ha seleccionado el data logger de Agilent 34970A, que es el encargado de transferir los datos al PC mediante el protocolo de comunicación GPIB.

El Agilent 34970A se trata de un instrumento de gran flexibilidad y adaptabilidad ya que los módulos de adquisición de datos son intercambiables. En concreto, el data logger de la instalación se ha equipado con tres multiplexores de 22 canales HP 34901A.



Figura 33. Data logger 34970A y multiplexores

El multiplexor escogido se trata del modelo más versátil de los disponibles para la unidad de adquisición de datos Agilent 34970A, ya que combina un gran número de canales multifunción con una tasa de escaneo de 60 canales por segundo, con lo que consigue obtener una elevada densidad de datos durante los ensayos. Las diferentes entradas que admite son las siguientes: termopares, termorresistencias de 2 y 4 hilos, termistores, voltaje de corriente alterna y continua, resistencias de 2 y 4 hilos, frecuencias, periodos y corriente alterna y continua. Además ofrece conexión directa con el multímetro digital interno del data logger.

Para la adquisición de datos en el PC se emplea el software BenchLink Data Logger 3 de Agilent Technologies, del cual la Figura 34 muestra una captura de pantalla. Se trata de un software basado en Windows, mediante el que se puede representar en pantalla la información proveniente de hasta 4 datalogger Agilent 34970A o 34972A, así como guardar los datos, analizarlos o exportarlos a otros programas para su tratamiento y análisis.

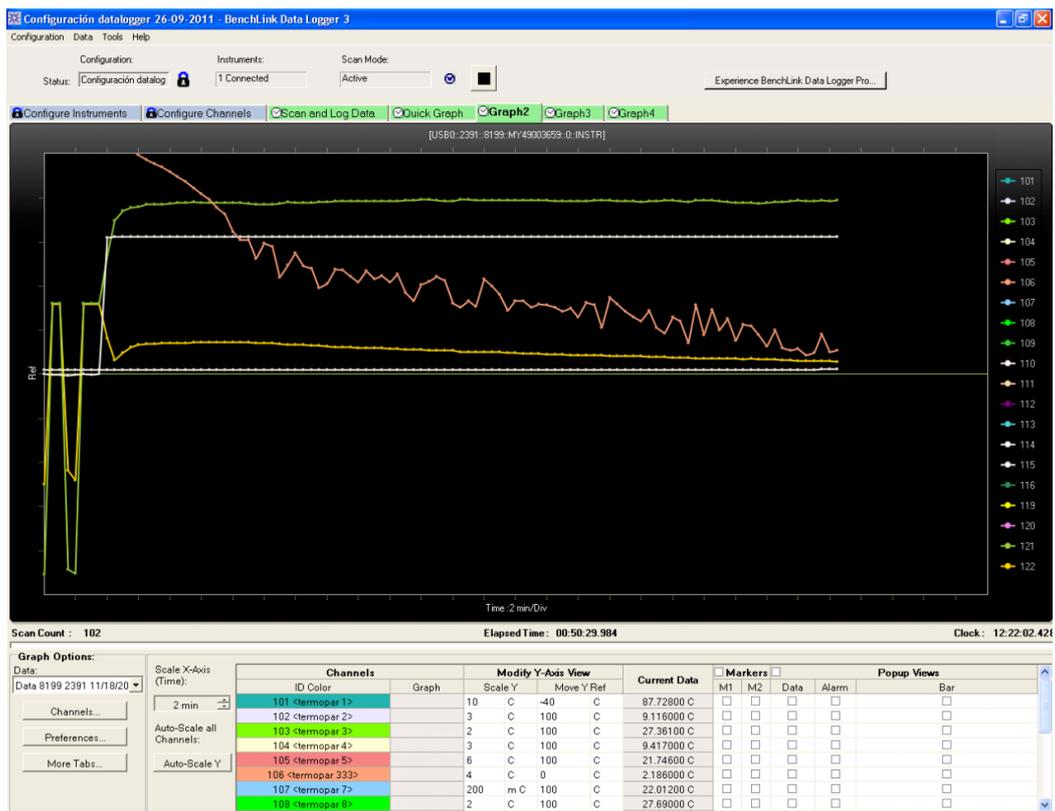


Figura 34. Interfaz del software BenchLink Data Logger 3

4.12. Coriolis

La medida de flujo másico del fluido caloportador a través del circuito principal es primordial para el análisis de los resultados. Para tal fin se ha seleccionado el caudalímetro de efecto coriolis MASS 2100 DI 15 de SIEMENS, mostrado en la Figura 35.



Figura 35. Coriolis de SIEMENS en la instalación

El principio de funcionamiento del caudalímetro se basa en medir el desfase entre la vibración de los dos extremos de la tubería interna, causado por la variación de momento de inercia de la masa de fluido en movimiento según se acerca o aleja del centro de rotación. El dispositivo posee un “Display” que permite el ajuste de la velocidad de la bomba del circuito principal en función del caudal deseado, y la señal de salida enviada al “data logger” es una señal de intensidad de 4 a 20 mA.

4.13. Foco frío. Chiller

El chiller consiste en un prototipo que ha sido desarrollado y analizado anteriormente en el IIE empleando propano como fluido de trabajo. Consta de un compresor alternativo semihermético BITZER y los intercambiadores empleados han sido el SWEP B80 de 26 placas como condensador y el SWEP V80 de 26 placas como evaporador. El prototipo también incluye una válvula de expansión electrónica de modulación proporcional, que permite regular el recalentamiento del fluido de trabajo a la entrada del compresor.

Al estar concebida como bomba de calor para trabajar con propano, se han tenido que hacer algunas modificaciones para adaptarla a la instalación de PCMs.

En primer lugar, se ha descartado el uso de propano como refrigerante al no poseer la instalación de PCMs las medidas de seguridad pertinentes para trabajar con hidrocarburos. El chiller puede trabajar además con R22 y R407C, el cual también se ha descartado por tener menores prestaciones al ser una mezcla zeotrópica. Finalmente se ha optado por usar el R22 por poseer una mayor capacidad específica y no ser inflamable.

Las prestaciones del chiller han sido previamente estudiadas mediante el software IMST-ART. En este software, cuya ventana principal muestra la Figura 36, se han introducido las características de todos los componentes del chiller (evaporador, condensador, compresor y válvula de expansión).

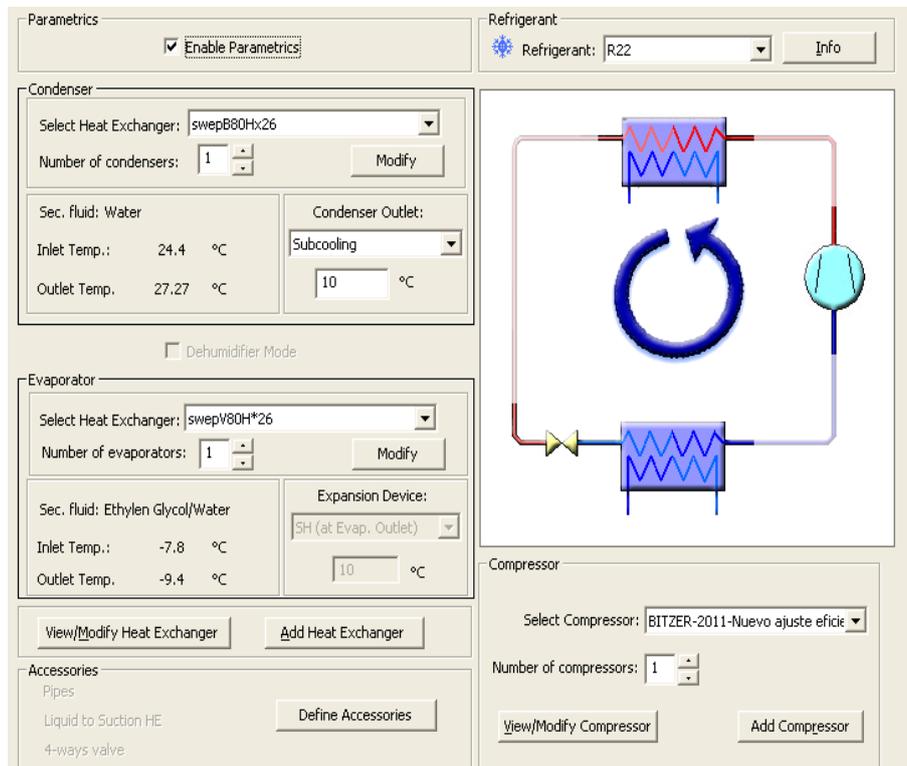


Figura 36. Interfaz principal del IMST-ART

El chiller utiliza como foco caliente el agua de condensación de la instalación general del edificio, la cual circula a una temperatura media de 25°C, y como foco frío el agua del circuito secundario, el cual a su vez enfría el fluido del circuito principal por medio del intercambiador de placas 2.

La Tabla 14 resume las principales prestaciones teóricas de la máquina termodinámica, y la Figura 37 muestran los puntos teóricos del ciclo termodinámico.

Summary Compressor Condenser Evaporator Accessories Refrigerant		
	Units	Case 1
Condensation Temp.	°C	34.467
Evaporation Temp.	°C	-17.903
Condensation Press.	kPa	1337
Evaporation Press.	kPa	266.07
Condenser SubCooling	K	10
Total SubCooling	K	10
Evaporator Superheat	K	10
Total SuperHeat	K	15.76
COP		2.5544
COP Fan/Pump Included		2.3227
EER		8.7237
EER Fan/Pump Included		7.9324
Total Carnot Eff.	%	52.408
Total Carnot Eff. Fan/Pump Included	%	47.655
COP(HPA)		3.6008
COP(HPA) Fan/Pump Included		3.2742
EER(HPA)		12.297
EER(HPA) Fan/Pump Included		11.182
TCE(HPA)	%	61.3
TCE(HPA) Fan/Pump Included	%	55.74
Cooling Capacity	kW	8.6876
Heating Capacity	kW	12.246
Mass Flowrate	kg/s	0.049634
Comp. Disch. Temp.	°C	106.78
Power Input	kW	3.4011
Isentropic Eff.	%	64.934
Compressor Eff.	%	64.285
Volumetric Eff.	%	73.083

Tabla 14. Resumen del análisis del ciclo

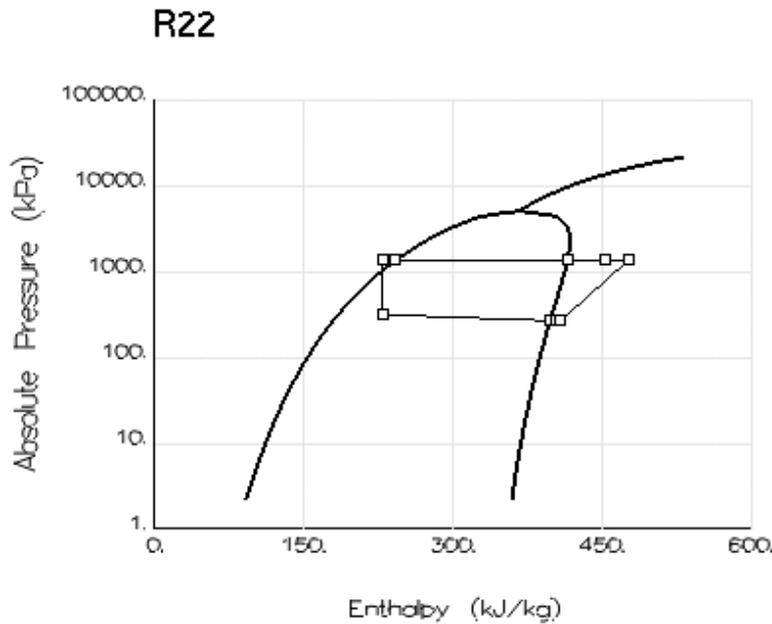


Figura 37. Ciclo termodinámico teórico

La Figura 38, Figura 39 y Figura 40 muestran el efecto que tiene la variación del recalentamiento del vapor a la salida del evaporador sobre la potencia frigorífica entregada, la potencia eléctrica consumida y el COP. Como se puede observar, la disminución del recalentamiento supone una disminución de la potencia consumida y un aumento de la potencia frigorífica, lo que se traduce en una mejora del COP. Es por esto que se intentará operar con un recalentamiento de 8K siempre que no implique riesgo de introducir gotas de líquido al compresor. El control de éste parámetro se llevará a cabo mediante el software Plant Visor, tal y como ha sido explicado en el siguiente capítulo.

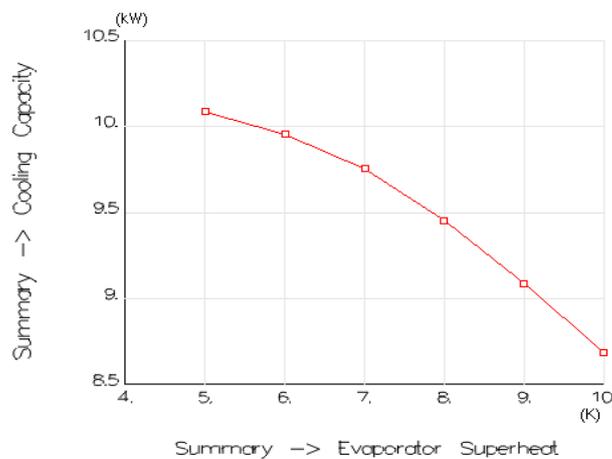


Figura 38. Efecto del recalentamiento sobre la potencia frigorífica

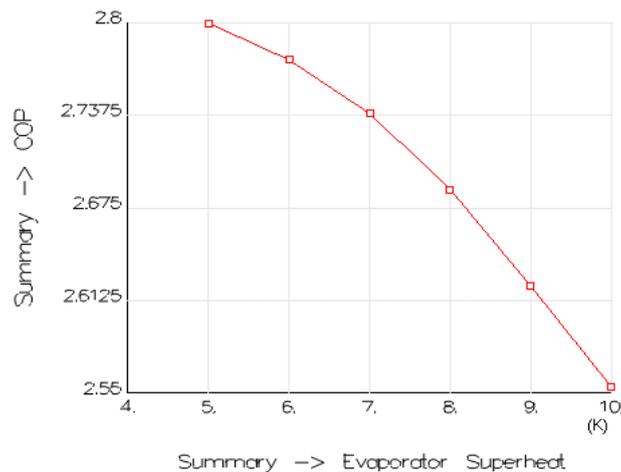


Figura 39. Efecto del recalentamiento sobre el COP

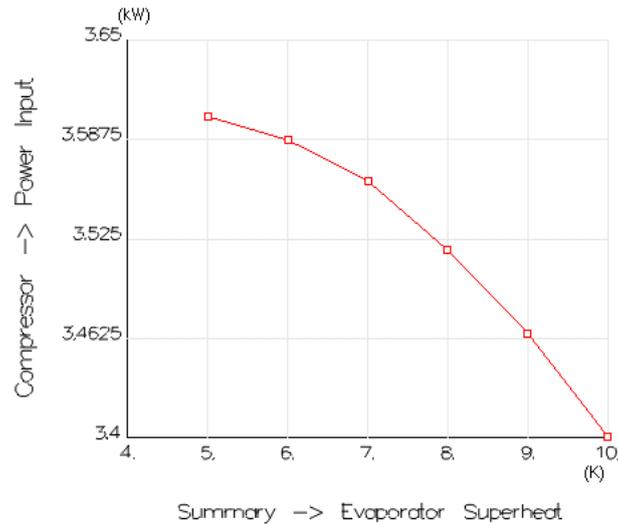


Figura 40. Efecto del recalentamiento sobre la potencia consumida

4.14. Foco caliente

Como se puede comprobar en el ESQUEMA, el circuito secundario del foco caliente puede utilizar tanto el agua de calefacción como el agua de condensación del edificio, las cuales circulan a una temperatura media de 55°C y 23°C, respectivamente.

Para otros PCM que requieran una mayor temperatura, se utilizarán dos calentadores eléctricos instantáneos de 27 kW cada uno para elevar la temperatura del agua de calefacción hasta la temperatura requerida.

Como este intercambiador trabaja en un lado con agua sin glicol, se ha dotado de un sistema anti hielo, pues aunque éste quedaba puenteado durante los procesos de carga, el agua termina congelándose al enfriarse por conducción durante las cargas, con el riesgo de rotura que esto implica para el intercambiador. Este sistema consta de las válvulas Vh8, Vh9, Vh10 y Vh11 para permitir el vaciado de la parte de agua de condensación.

4.15. Adaptación del depósito CALMAC a la instalación

El intercambiador consiste en una serie de espirales planas apiladas. La entrada y la salida de cada espiral están dispuestas de forma que en un plano el fluido circula a contracorriente respecto a los planos superior e inferior. Es decir, si a una espiral entra el fluido por el exterior y sale por el interior del depósito, en las espirales superior e inferior a la primera entra el fluido por el interior y sale por el exterior (Figura 41). Esta disposición permite reducir la estratificación térmica dentro del depósito.

Todas las entradas y salidas de las espirales están conectadas mediante un colector en la entrada del depósito. Las espirales no están conectadas entre sí por ningún otro punto. El intercambiador mantiene su forma gracias a unas bridas que sujetan las espirales en su posición.

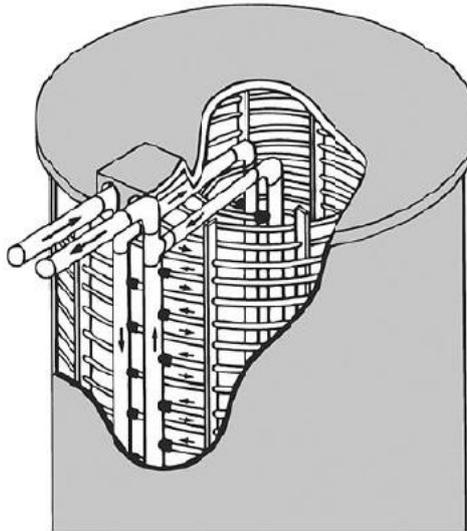


Figura 41. Esquema del recorrido del fluido caloportador en el depósito

El depósito de CALMAC a plena carga tiene una capacidad calorífica de 345 kWh. Así pues, para cargar el depósito en el tiempo estándar (10-12 h) sería necesario un chiller de cómo mínimo de 29 kW. Adicionalmente, para poder realizar los ensayos a temperatura de impulsión constante, se debe compensar el pico de potencia inicial, con lo cual la potencia a instalar debería ser del orden de 90 kW.

El chiller disponible en las instalaciones del IIE tiene una potencia de aproximadamente 9 kW como se ha visto anteriormente con el IMST-ART. Esta capacidad es claramente inferior a los 90 kW requeridos, por lo cual se ha decidido utilizar únicamente la mitad de la capacidad del depósito de CALMAC ICEBANK. De esta manera, se podrán caracterizar mejor los modelos que se desarrollan para ACCIONA paralelamente a este PFC. En los ANEXOS se pueden observar en detalle el intercambiador del depósito CALMAC, las dimensiones del depósito y las características técnicas más importantes, respectivamente.

Puesto que el depósito solo se llenará hasta la mitad en altura, para reducir el gasto másico del circuito primario, se ha optado por modificar el serpentín del depósito de manera que tan solo circule el fluido caloportador por los tubos que se encuentran sumergidos en el material de cambio de fase.

La solución adoptada para modificar el depósito de un modo reversible ha sido utilizar un accesorio utilizado en fontanería para tubería de polipropileno, es de rápido montaje y cumple las especificaciones técnicas de la instalación de PCMs.

El modo de instalación de este accesorio ha sido cortando las ocho primeras parejas de tubos y obturando sus respectivas salidas desde los colectores del intercambiador roscando un tapón a la salida del conector hembra, de manera que estos tan sólo alimentan a las 9 últimas parejas de tubos del fondo del intercambiador. La Figura 42 muestra un detalle de la instalación de estos accesorios en unos de los colectores del intercambiador.



Figura 42. Detalle de uno de los colectores modificados

Una vez finalicen los ensayos con el depósito CALMAC y se acople el depósito compacto, se volverán a conectar los tubos anulados a los colectores para poder utilizar el depósito a plena carga en su instalación de destino. Para ello se usará en el otro extremo de los tubos cortados el mismo accesorio utilizado en los colectores y se unirán por un conector macho-macho de latón. Este montaje ha sido probado y se puede observar en el primer tubo no obturado de la Figura 42.

Se ha diseñado la instalación de almacenamiento térmico con cambio de fase en función de los ensayos a realizar y de las limitaciones del propio laboratorio del IIE.

Han sido seleccionados todos los componentes hidráulicos, eléctricos y de control, así como se han estudiado a fondo las prestaciones que ofrece el chiller de la instalación y se ha adaptado el depósito CALMAC a la capacidad de éste.

5. PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN

5.1. Coordinación de los trabajos

Tras la fase de diseño de la instalación, se ha procedido a seleccionar y hacer los pedidos de todos los equipos necesarios en la instalación para coordinar la recepción de éstos con los trabajos a desarrollar en el laboratorio del IIE.

Los pedidos realizados de mayor importancia han sido el del depósito CALMAC ICEBANK, las bombas e intercambiadores de placas de la instalación, las válvulas de tres vías y actuadores de acción proporcional y el glicol necesario en los circuitos primario y secundario. La Figura 43 muestra dos imágenes tomadas durante el transporte del depósito CALMAC a las instalaciones del IIE.



Figura 43. Detalles de la recepción del depósito CALMAC ICEBANK

Se han coordinado y supervisado todos los trabajos externos implicados en la instalación de almacenamiento térmico, entre los que han estado los trabajos eléctricos, de fontanería y de aislamiento de las tuberías, todos ellos contratados a Ageval Servicio S.A (Ageval). En los trabajos de fontanería también se incluyen la modificación del depósito CALMAC, tal y como se ha explicado en el Capítulo 4.

5.2. Puesta a punto de la instalación

5.2.1. Reparación de fugas

La reparación de fugas ha retrasado sustancialmente los plazos previstos para la instalación. Aunque las fugas se han dado mayoritariamente en uniones roscadas también aparecieron algunas en uniones soldadas, ambas provocadas por una deficiente ejecución por parte de Ageval.

Aunque en su día se realizaron las pruebas de estanqueidad pertinentes antes de dar el visto bueno a la instalación, no es hasta transcurrido suficiente tiempo cuando se dejan ver estas deficiencias, una vez ya se ha aislado térmicamente la instalación y se han presurizado con agua-glicol ambos circuitos.

Para reparar cada fuga, el procedimiento a seguir consiste en retirar el aislamiento térmico y vaciar el tramo con problemas junto con el camino más corto hasta el punto de drenaje, recuperando al mismo tiempo el agua-glicol.

Tras esto se procedía a reparar la fuga y hacer una prueba de estanqueidad con agua. Una vez comprobado que se había solucionado el problema, se presurizaba de nuevo el circuito con el agua-glicol retirada anteriormente por medio de una bomba auxiliar como se ha explicado anteriormente. Finalmente, se aísla de nuevo el tramo que ha quedado al descubierto.

Todas estas etapas se han hecho de forma repetida hasta que se eliminaron todas las fugas que han ido surgiendo.

5.2.2. Arranque y recirculación de las bombas

La bomba de velocidad variable del circuito principal tiene 19 niveles de frecuencia, cada una correspondiente a una curva motriz distinta en la Figura 44.

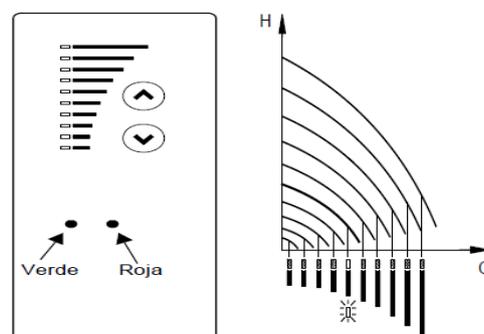


Figura 44. Display y curvas motrices de la bomba Grundfos CRE 5-5

Para purgar la bomba, se arranca la bomba a la mínima velocidad y con la válvula de corte de la impulsión totalmente cerrada. Se abre progresivamente el purgador de la bomba a medida que se aumenta la velocidad de giro y se abre la válvula de corte.

5.2.3. Cálculo de las curvas resistente y motriz

Durante la fase de puesta a punto de la instalación uno de los objetivos es verificar que la instalación funciona tal y como se ha diseñado y que los equipos de medida se han instalado y calibrado de forma correcta.

Una vez arrancadas las bombas, se comprobó inicialmente que el caudal máximo que podía impulsar la bomba del circuito principal era del orden de 2.5 m³/h, es decir claramente inferior a las condiciones de diseño (caudal máximo de 4 m³/h). Se realizaron distintos ensayos para recircular el fluido por distintos componentes del circuito primario y detectar qué elemento provocaba la mayor pérdida de presión. Se compararon los resultados con la altura resistiva teórica de cada elemento de la instalación, calculada con el programa SF PRESSURE DROP, cuya interfaz es mostrada en la Figura 45.

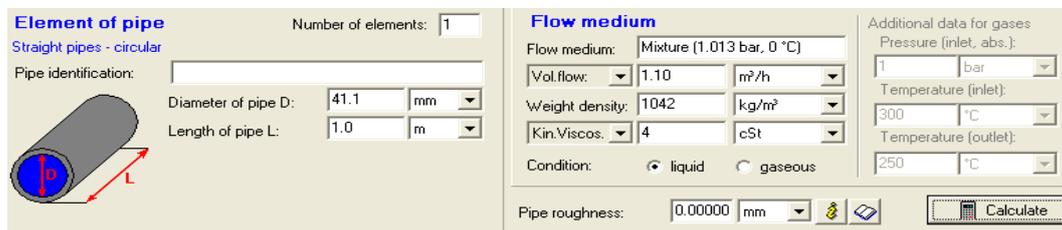


Figura 45. Interfaz del programa SF Pressure Drop

Este estudio ayudó a descartar hipótesis y a localizar el problema, pues eran las válvulas de 3 vías las que recirculaban el agua desde la impulsión a la aspiración de la bomba, e impedían que casi la mitad del caudal trasegado por la bomba llegase al depósito CALMAC. Pese a las indicaciones que se les había hecho a Ageval, las válvulas de 3 vías que se instalaron entre Noviembre y Diciembre 2010 impedían cerrar el flujo completamente.

Esto implicó rehacer los bypasses propuestos originalmente mediante válvulas de 3 vías con válvulas de corte sencillas. Las nuevas válvulas añadidas en sustitución de las de 3 vías manuales son la V15, V16, V25 y V26, que regulan los trayectos “upstream” y “downstream” y las válvulas V31, V32 y V3, que permiten hacer el bypass del depósito

CALMAC en caso de necesidad, como se puede comprobar en el esquema de la instalación (Figura 15).

5.2.4. Trabajos en el cuadro eléctrico principal

En el cuadro eléctrico principal (Figura 46) se han realizado trabajos en la fase de puesta a punto, bien sean de detección de fallos por parte de la empresa instaladora o bien sean de ampliación.



Figura 46. Cuadro eléctrico principal

En primer lugar se detectó que el guardamotor de la bomba del circuito secundario no había sido seleccionado correctamente por la empresa instaladora, pues estaba previsto para una potencia menor y tuvo que ser remplazado.

También se detectó, al intentar programar el coriolis, que había un problema en su circuito de alimentación debido a un error cometido por el técnico que montó el cuadro eléctrico. La empresa instaladora se hizo cargo de ambos fallos y los solventó lo antes posible.

También ha sido instalado en la instalación del analizador de redes para monitorizar la potencia consumida por el chiller. Éste sistema envía al datalogger de la instalación los datos referentes a potencia activa consumida, así como tensión e intensidad de línea, con los que se pueden obtener también el factor de potencia y potencia reactiva.

En la Figura 47, se puede observar el detalle de la instalación del analizador de redes.



Figura 47. Analizador de redes del chiller Camille Bauer Sineax DME442

También se han conectado a tierra las pantallas de los circuitos de sensores de presión y termopares de control para reducir el ruido producido en las señales por contaminación electromagnética.

5.2.5. Puesta a punto del chiller

La puesta a punto del chiller ha supuesto trabajos de todo tipo, tanto en los circuitos hidráulicos como en el circuito del refrigerante, así como rehacer desde cero los circuitos eléctricos y de control, pues el chiller estaba inicialmente concebido como bomba de calor y para otras temperaturas de trabajo. Finalmente se ha debido sustituir el aislamiento por otro de mayor espesor debido a las bajas temperaturas a las que se encuentra el evaporador.

- Trabajos en los circuitos hidráulicos

Estos se han basado en la adecuación de las tomas hidráulicas para las conexiones flexibles que unían el chiller con la instalación: el evaporador con el circuito secundario y el condensador con el agua de condensación del edificio.

También se ha invertido el montaje y realizado labores de mantenimiento en los presostatos diferenciales para detectar que existe flujo en el evaporador y condensador, pues estaban instalados para trabajar como bomba de calor. Ambos flujostatos de presión diferencial se pueden observar en la Figura 48.



Figura 48. Flujostatos de presión diferencial del evaporador y condensador

Esta diferencia de montaje se debe a que al invertir el funcionamiento de la máquina, los intercambiadores de calor del evaporador y condensador quedarían trabajando en modo equicorriente, disminuyendo así su eficiencia.

La misión de estos componentes es asegurar que hay flujos en ambos intercambiadores antes de que arranque el compresor y evitar sobrepresiones en el condensador así como proteger que las bombas de la instalación funcionen en vacío o en seco.

- Trabajos en el circuito frigorífico

Primeramente se procedió a descargar el refrigerante original de la máquina, puesto que éste era propano y debido a las temperaturas de trabajo convenía más trabajar con R-22.

Se ha realizado el vacío en el circuito frigorífico para eliminar el refrigerante disuelto en el aceite del compresor y se ha cargado con 1.640 kg de R-22.

Tras esto, se han instalado los manómetros digitales que muestra la Figura 49, incluyendo el tubo capilar que se puede observar, pues las bajas temperaturas en el evaporador agrietaron por conductividad la válvula de corte instalada en el manómetro de baja presión.



Figura 49. Detalle de los manómetros digitales

También se han instalado dos sensores de presión EMERSON en la tubería de aspiración del compresor, uno para el control de la válvula de expansión y otro para tener monitorizadas las presiones de trabajo y hacer un seguimiento detallado del ciclo termodinámico descrito por el refrigerante. Más tarde, el sensor de presión de control de la válvula de expansión ha sido sustituido por su homólogo de la marca CAREL para evitar problemas de comunicación con el controlador de la válvula, ambos también de CAREL.

Tanto los sensores de presión como los presostatos de las líneas de alta y baja presión han sido instalados usando tubo capilar para suavizar las temperaturas extremas del gas en cada tubería. En la Figura 50 se muestran las tomas de los 3 sensores de presión y los dos termostatos, así como los dos sensores de presión de la línea de succión del compresor.

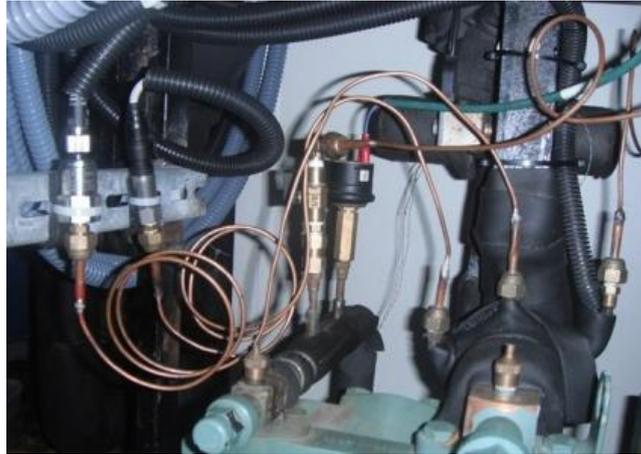


Figura 50. Detalle de capilares y sensores de presión en la succión

Igualmente, a la salida del compresor se añadió un sensor de presión ROSEMOUNT (Figura 51) para monitorizar la presión de alta. El presostato de presión de la línea de baja presión fue remplazado al estar averiado el original.



Figura 51. Sensor de presión ROSEMOUNT

- Trabajos en los circuitos eléctricos

Primeramente, se ha instalado un contactor de potencia adecuada y un temporizador para retardar el arranque del compresor mientras la válvula de expansión se abre e

igual a las presiones de alta y baja, con el fin de disminuir el par de arranque del motor eléctrico y prolongar así su vida útil.

Como se detalla más adelante, se ha añadido también el microchiller que gobierna la operación del chiller y una fuente de alimentación de corriente continua de 24V para los sensores de presión descritos anteriormente.

Los elementos añadidos como la fuente de alimentación y los presostatos diferenciales han tenido que ser cableados hasta el cuadro eléctrico principal de la instalación. También se ha sustituido la bobina de la válvula de expansión al averiarse la original.

- Trabajos en los circuitos de control

En cuanto al control de la válvula de expansión, se ha sustituido el PID que la controla así como la sonda que mide la temperatura de aspiración del compresor.

También se cableó el circuito necesario para conectar de manera permanente un ordenador al controlador de la válvula de expansión, y poder consultar y programar en todo momento parámetros como el recalentamiento a la salida del evaporador mediante el software “PlantVisor”. Conviene destacar la importancia de esta supervisión, pues nunca debe llegar el refrigerante líquido a la succión del compresor.

En la Figura 52 se muestra una captura de dicho software de Carel controlando la válvula de expansión durante un ensayo de carga, con la consigna de obtener un recalentamiento de 10°C en la aspiración del compresor.

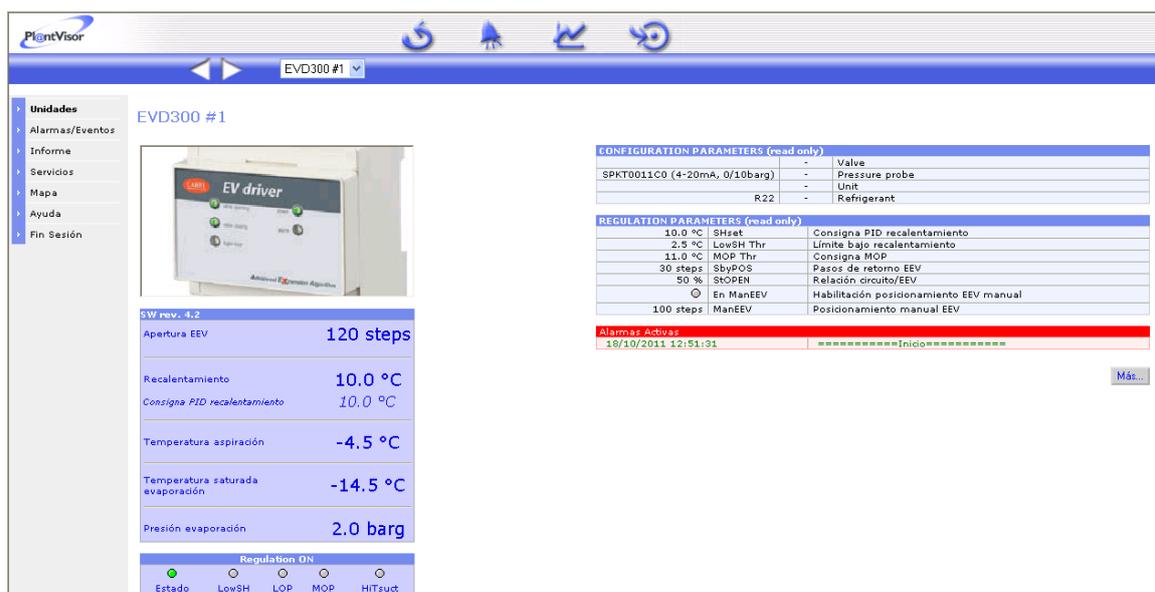


Figura 52. Captura de pantalla del Plant Visor de Carel

Para controlar la maniobra del chiller se ha instalado el microchiller que se aprecia en la Figura 53, donde se programan tanto el “setpoint” como el “deadband” o banda muerta. La sonda de control del microchiller, como se puede comprobar en la Figura 16, está instalada aguas abajo de la bomba del circuito secundario, justo antes del intercambiador del foco frío.



Figura 53. Detalle del Display del microchiller

Este microchiller también dispone de una alarma anti-hielo para proteger los intercambiadores de placas. En este caso, la sonda está instalada en la salida del circuito hidráulico del evaporador y la alarma está tarada en -13°C , pues la concentración del glicol en ese circuito es de 30% aproximadamente.

La

Figura 54 muestra el chiller tras la puesta a punto de la instalación, incluyendo todos los trabajos descritos en este capítulo.



Figura 54. Chiller en la instalación tras la puesta en marcha

5.2.6. Control de la instalación

En la Figura 16 se puede observar el circuito hidráulico más el circuito control de la instalación. Existen dos controladores, de WATLOW y de PMA, que regulan respectivamente el foco frío y el foco caliente. En la siguiente imagen se aprecia la ubicación de ambos PIDs en el cuadro eléctrico principal.



Figura 55. PIDs del cuadro eléctrico principal

- Control del actuador del foco frío

El control del foco frío se realiza por medio del controlador WATLOW, el cual regula el caudal de agua del circuito secundario que entra en el intercambiador del foco frío, en función de la temperatura de consigna establecida para la entrada del depósito CALMAC durante la carga. Esto se puede comprobar en el esquema que muestra la Figura 16 donde la sonda de control tiene la nomenclatura T1.

- Control del actuador del foco caliente

El control del foco caliente se realiza por medio del controlador PMA, el cual regula el caudal de agua de condensación que entra en el intercambiador del foco caliente, en función de la temperatura de consigna establecida para la entrada del depósito CALMAC durante la descarga, es decir, el termopar T10. Esto se puede comprobar en la Figura 16.

Para ambos controladores se ha realizado el ajuste tanto de los parámetros del PID, como los parámetros del actuador respectivo.

5.2.7. Termopares y termoresistencias de la instalación

Para poder analizar y controlar correctamente los procesos de carga y descarga del depósito de PCMs, es necesario conocer la temperatura de distintos puntos de la instalación, tal y como muestra la Figura 16.

Esta instrumentación se ha llevado a cabo instalando termopares Tipo T en la mayoría de puntos a medir y termoresistencias PT 100 en la entrada y salida del depósito CALMAC.

La forma instalar ambos dispositivos ha sido utilizando “termopozos” a partir de tubo de cobre capilar de 3 mm de diámetro. La Figura 56 muestra dos cables de termopar como los usados en la instalación y el croquis del montaje del termopozo en la instalación.

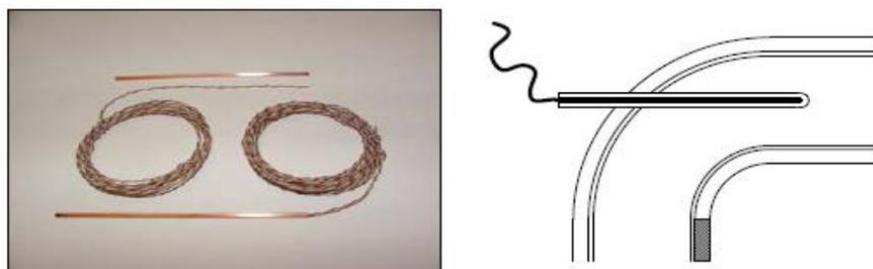


Figura 56. Detalle de dos termopares y croquis de un termopozo

El proceso de instalación es el mismo tanto para los termopares como para las termoresistencias. Una vez ha sellado el tubo capilar por uno de los extremos, se introduce en el tubo de la instalación que lo va a alojar que previamente ha sido perforado, y se sueldan ambos elementos de manera que el termopozo quede siempre enfrente al flujo del fluido caloportador.

Tras esto, se rellena el tubo capilar con pasta de alta conductividad térmica para evitar que queden bolsas de aire que perturben las medidas y así poder detectar los cambios de temperatura más rápidamente. Finalmente, se introduce cuidadosamente el termopar o la termoresistencia.

5.2.8. Termopares del depósito CALMAC

La instrumentación del interior del depósito CALMAC ha sido un proceso complicado, tanto por los distintos procesos de transmisión de calor que intervienen como por la difícil accesibilidad que ofrece el serpentín a los puntos de mayor interés.

Los termopares de dentro del depósito se pueden agrupar en dos bloques, los llamados “regletas” y las “triadas”. El primer grupo mide la temperatura del material de cambio de fase en el centro y exterior del depósito a distintas alturas. El segundo grupo mide la temperatura del fluido caloportador en dos tubos consecutivos (y contracorriente) y la temperatura del material de cambio de fase entre ambos. Adicionalmente se mide la temperatura del aire dentro del depósito, las de las paredes interna y externa. En la Figura 57 se ha representado un croquis del posicionamiento de todos los termopares dentro del depósito de CALMAC ICEBANK.

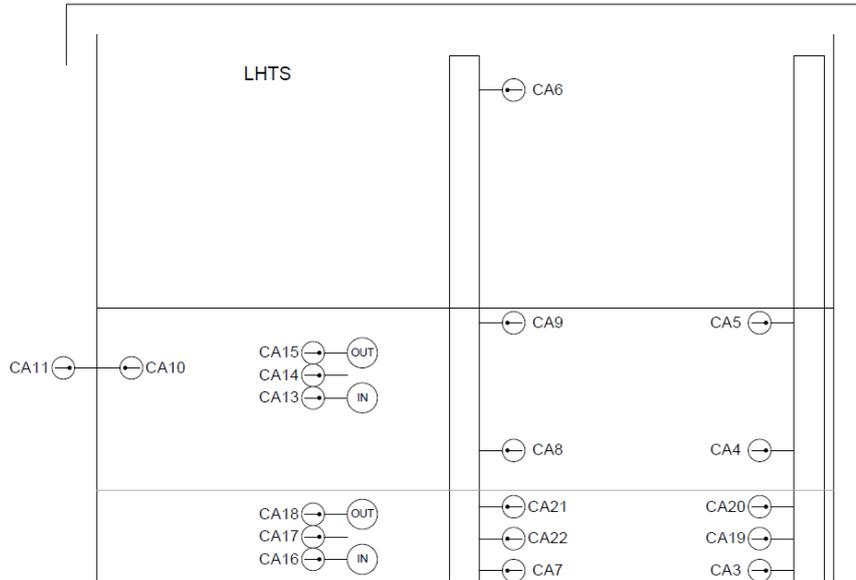


Figura 57. Croquis distribución termopares en depósito CALMAC

Como se puede observar, se han instalado dos “subregletas” en cada una de ellas para tener siempre medidas de la estratificación de temperaturas en el PCM tanto en los ensayos a mitad de capacidad como en los de un sexto de capacidad.

El montaje de las triadas ha sido delicado porque para conseguir medir con exactitud la temperatura del agua-glicol, los termopares deben estar aislados y el aislante impermeabilizado. Esto se ha solucionado utilizando una silicona para recubrir el aislante térmico.

A lo largo de las siguientes figuras se ilustra el proceso de instalación de las triadas. Inicialmente se han fijado con bridas los termopares a los tubos y se han recubierto con cinta de aluminio para homogeneizar la temperatura alrededor del termopar, tal y como muestra la Figura 58.

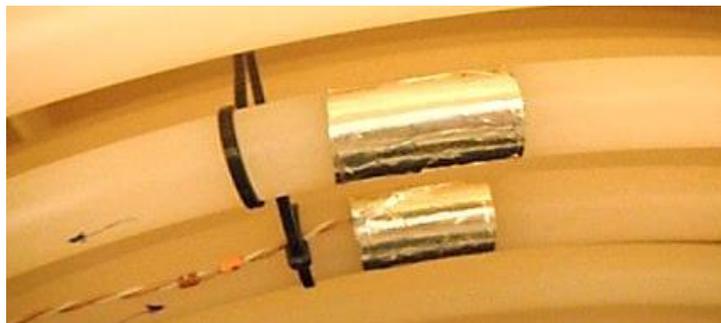


Figura 58. Detalle fijación de los termopares de las triadas

A continuación se han rodeado completamente con aislante térmico sin dejar espacio vacío entre los tubos tal y como muestra la Figura 59.

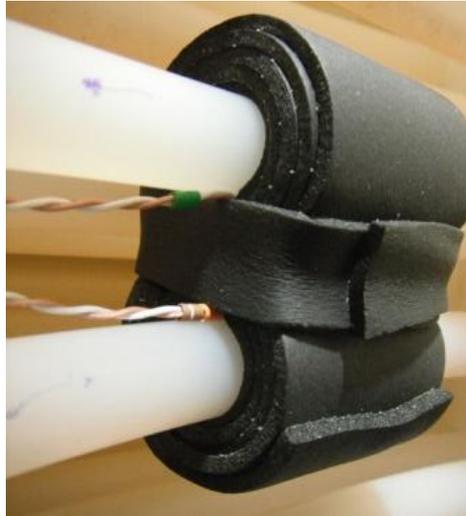


Figura 59. Detalle del aislamiento térmico de los termopares

Finalmente se ha impermeabilizado el conjunto con silicona y se ha colocado el tercer termopar de la triada, que tiene la función de medir la temperatura del material de cambio de fase entre ambos tubos de la triada, tal y como ilustra la Figura 60.



Figura 60. Detalle impermeabilización triada superior

5.2.9. Llenado del depósito CALMAC

Tras instalar los termopares en el interior del depósito, se ha procedido a llenar a media carga y realizar algunos ensayos de prueba para visualizar los procesos de carga y descarga antes de cerrar el depósito definitivamente.

Una vez finalizada esta etapa de pruebas visuales sin tapa, se ha vaciado el depósito mediante la bomba auxiliar para poder instalar la tapa, pues no es posible realizarlo cuando el depósito está lleno debido a que la deformación que sufren las paredes. Con todo, no ha sido una tarea sencilla como consecuencia del gran tamaño de la tapa del depósito y a la deformación residual que quedó en las paredes tras hacer las primeras cargas sin la tapa.

Finalmente, se ha llenado el depósito CALMAC a un sexto de la altura por medio del registro de la tapa para poder así comenzar la primera campaña de ensayos.

Durante la puesta a punto de la instalación, se han coordinado todos los trabajos en la instalación y tras ellos, se ha revisado el correcto funcionamiento de las bombas y componentes de los lazos de control.

Al mismo tiempo, se ha adaptado el chiller para que trabaje cumpla con las demandas de la instalación de PCMs. Finalmente, se ha instrumentado la instalación para poder adquirir los datos necesarios en la caracterización del depósito CALMAC.

6. ENSAYOS REALIZADOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1. Ensayos a realizar

A continuación se resumen los ensayos a realizar para cada material de cambio de fase:

- Carga y descarga
- 3 caudales (2.5 a 4.5 m³/h)
- 3 temperaturas de entrada distintas en el depósito de PCMs.

Los ensayos a realizar con los depósitos de almacenamiento térmico son esencialmente dos; carga y descarga. El proceso de carga es aquel en el que se almacena la energía térmica, bien sea frío o calor, y en el de descarga se consume dicha energía térmica.

El ensayo de carga es aquel en el que se hará circular el fluido caloportador a través del serpentín hasta conseguir congelar el agua alrededor del serpentín (como muestra la Figura 61). En el ensayo de descarga, se descongelará el depósito introduciendo una carga térmica mediante el intercambiador de placas 1, el cual reproduce la carga térmica de refrigeración de un edificio.

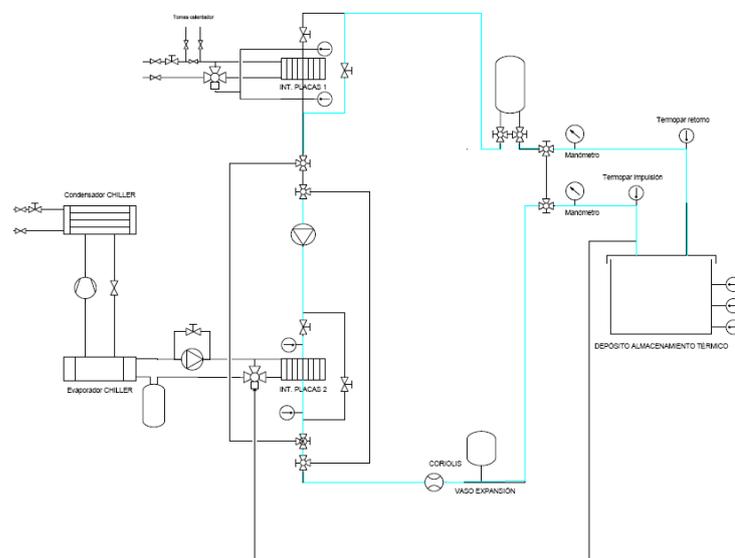


Figura 61. Ensayos de carga

Los ensayos de descarga se pueden dividir en ensayos simples y ensayos con producción simultánea del chiller. La descarga simple es un proceso en el cual sólo trabaja el intercambiador de calor del foco caliente y el chiller no entra en funcionamiento. Estos ensayos permiten la caracterización del proceso de descarga y el ajuste de los parámetros que intervienen en los modelos desarrollados.

Los ensayos con producción simultánea del chiller, pese a no ser necesarios para el desarrollo de los modelos, sí son interesantes desde un punto de vista práctico. Este tipo de ensayo puede ser "upstream" o "downstream", dependiendo de si fluido caloportador va al foco caliente o al depósito de PCMs justo después del foco frío. En la Figura 62 y Figura 63 se puede observar la diferencia entre ambos ensayos.

Los ensayos experimentales con el depósito CALMAC se han centrado esencialmente en las descargas simples pues son las que permitirán el desarrollo de los modelos, además de por estar muy limitado el chiller para trabajar en estas condiciones. Una vez puesta en marcha la instalación con el depósito COMPACTO, se ensayarán para cada material PCM la de descarga "upstream" y "downstream" para su contraste con los resultados de los modelos. Una vez desarrollados los modelos de carga/descarga en TRNSYS, éstos permitirán un análisis exhaustivo de las configuraciones y estrategias de operación más interesantes para reducir el consumo energético de la instalación.

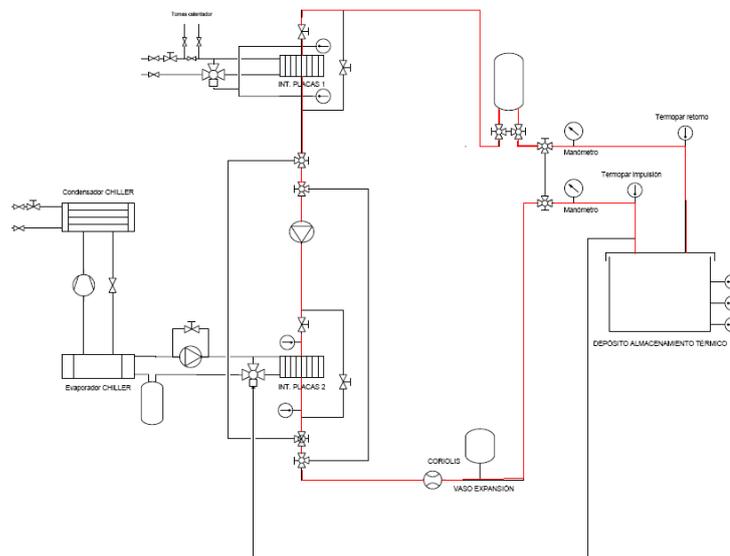


Figura 62. Ensayos de descarga "upstream"

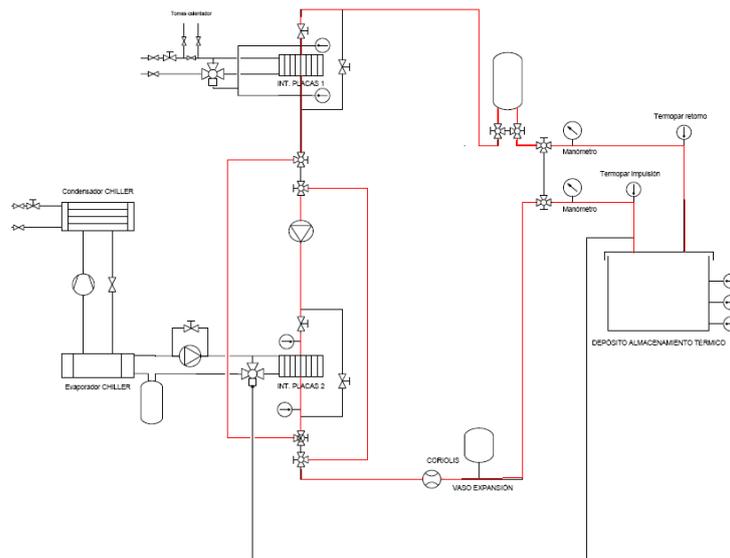


Figura 63. Ensayos de descarga "downstream"

6.2. Ensayos realizados

En este apartado se resumen los ensayos realizados para caracterizar el depósito CALMAC con agua/hielo como material de cambio de fase. Existen dos familias de ensayos, agrupados en función de la altura de agua introducida en el depósito. Dentro de cada familia, se puede distinguir entre carga y descarga.

En la Tabla 15 se muestra la nomenclatura utilizada para los ensayos correspondientes a 50 kWh, capacidad que corresponde a una altura de 23 cm de agua en el depósito, así como el caudal y temperaturas de impulsión medios durante el cambio de fase.

CARGAS	e1	e3	e5	e1'	e3'	e5'	e1''	e3''	e5''
Caudal medio 1º (kg/h)	2752	3801	3266	3286	3821	2778	3496	3850	2798
T impulsión media (°C)	-6.6	-4.4	-5.3	-5.0	-4.6	-5.2	-3.6	-3.4	-3.9
DESCARGAS	e2	e4	e6	e2'	e4'	e6'	e2''	e4''	e6''
Caudal medio 1º (kg/h)	3929	3890	3346	3756	3914	3887	3036	3015	3520
T impulsión media (°C)	14.8	13.0	10.5	14.1	12.3	10.2	14.2	12.2	10.3

Tabla 15. Resumen de los ensayos con 50kWh de capacidad

En la Tabla 16 se muestra la nomenclatura utilizada para los ensayos correspondientes a 138kWh, capacidad que corresponde a una altura de 70cm de agua en el depósito, así como el caudal y temperaturas de impulsión medios durante el cambio de fase.

CARGAS	E1	E3	E5	E1'	E3'	E5'	E1''	E3''	E5''
Caudal medio 1º (kg/h)	3850	3314	2618	3856	3510	2969	2454	1915	1574
T impulsión media (°C)	-2.5	-2.9	-3.6	-2.5	-2.7	-3.1	-3.7	-4.5	-5.2
DESCARGAS	E2	E4	E6	E2'	E4'	E6'	E2''	E4''	E6''
Caudal medio 1º (kg/h)	4066	3514	2790	4077	3691	3134	4038	3479	2959
T impulsión media (°C)	14.5	14.3	14.0	12.8	12.7	12.7	10.7	10.6	10.6

Tabla 16. Resumen de los ensayos con 138kWh de capacidad

6.3. Protocolo experimental

Aunque el Manual de la Instalación se encuentra detallado en el Doc. Nº 2 del proyecto y se describen con todo detalle las normas de utilización de la instalación, en el presente apartado se describen los pasos esenciales seguidos para llevar a cabo un proceso de carga y de descarga.

6.3.1. Ensayo de carga

La secuencia a seguir para lanzar un ensayo de carga siempre es la misma. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de descarga previamente:

1. Comenzar a adquirir los datos en el PC a través del datalogger
2. Abrir el bypass del intercambiador de placas del foco frío
3. Arrancar las bombas del circuito primario y secundario
4. Abrir las llaves de las tomas de agua de condensación del chiller
5. Activar el actuador del foco frío y fijar la temperatura de consigna
6. Arrancar el chiller y fijar un "setpoint" 5°C menos que la temperatura de consigna

La secuencia a seguir para parar un ensayo de carga siempre es la misma:

1. Parar el chiller
2. Desactivar el actuador del foco frío
3. Cerrar las llaves de las tomas de agua de condensación del chiller
4. Parar las bombas del circuito primario y secundario
5. Cerrar el bypass del intercambiador de placas del foco frío
6. Guardar los datos

6.3.2. Ensayo de descarga

La secuencia a seguir para lanzar un ensayo de descarga siempre es la misma. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de carga previamente:

1. Comenzar a adquirir los datos en el PC a través del datalogger
2. Conectar el intercambiador del foco caliente al circuito de agua de condensación
3. Activar el actuador del foco caliente y fijar la temperatura de consigna
4. Abrir el bypass del intercambiador de placas del foco caliente
5. Arrancar la bomba del circuito primario

La secuencia a seguir para parar un ensayo de descarga siempre es la misma:

1. Parar la bomba del circuito primario
2. Cerrar el bypass del intercambiador de placas del foco caliente
3. Desactivar el actuador del foco caliente
4. Aislar el intercambiador de placas 2 del circuito de agua de condensación y vaciar el agua de su interior
5. Guardar los datos

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se resume el trabajo realizado desde Junio 2010 hasta Septiembre 2011 en cuanto a la caracterización experimental del depósito comercial CALMAC ICEBANK.

El material de cambio de fase utilizado ha sido el agua/hielo y los ensayos de carga y descarga se han realizado con dos grados de llenado distintos, correspondiendo a capacidades latentes de 50 kWh y 138 kWh respectivamente.

En los próximos apartados se resumen los ensayos de carga y descarga que se han realizado. Todos los ensayos siguen un mismo patrón y por ello, se analizan en detalle un ensayo típico de carga y otro de descarga. A continuación, se ha realizado un ensayo cruzado entre todos los ensayos para analizar el efecto de variables importantes tales como el caudal o la temperatura de impulsión sobre la energía almacenada y los consumos. Finalmente, se resumen las conclusiones más relevantes del estudio.

7.1. Análisis de los ensayos

La distribución de los termopares internos en el depósito CALMAC se explicó en detalle en el Capítulo 5 y su conocimiento es importante para comprender los resultados que se muestran en el presente informe.

Como se explicado anteriormente, los termopares de dentro del depósito se pueden agrupar en dos bloques, los llamados “regletas” y las “triadas”. El primer grupo mide la temperatura del material de cambio de fase en el centro y exterior del depósito en distintas alturas. El segundo grupo mide la temperatura del fluido caloportador en dos tubos consecutivos (y contracorriente) y la temperatura del material de cambio de fase entre ambos. Adicionalmente se mide la temperatura del aire dentro del depósito, las de las paredes interna y externa.

7.2. Proceso de carga

Tal y como se ha explicado anteriormente, el proceso de carga posee un perfil típico que se repite a lo largo de todos los ensayos y se puede observar en la Figura 64 donde se muestra la evolución de las temperaturas registradas en las regletas interior y exterior del depósito a lo largo del ensayo E1. Están incluidas también las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador. En estos ensayos la temperatura de entrada no es constante sino que baja continuamente con el objetivo de aportar el máximo de potencia disponible del chiller y reducir al máximo el tiempo de carga.

Se pueden observar tres zonas delimitadas claramente, que son la parte sensible en estado líquido, el cambio de fase y la parte sensible en estado sólido.

Si se observan los resultados con más detalle, en la zona de enfriamiento sensible del PCM se aprecia una alteración de las temperaturas alrededor de los 4°C. Esto se debe a que ésta temperatura es donde se da la máxima densidad del agua líquida y por convección produce una inversión de temperaturas dentro del depósito CALMAC.

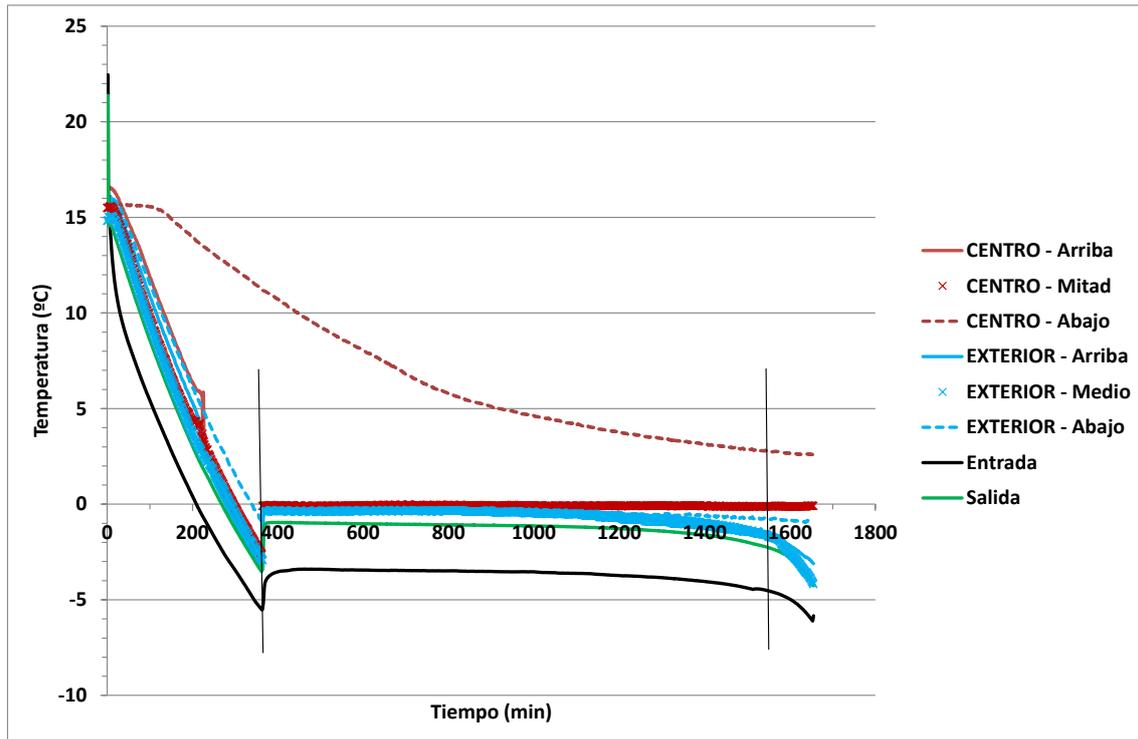


Figura 64. Temperaturas de las regletas interior y exterior (carga E1)

Al superarse esta zona de 4°C y homogeneizarse de nuevo las temperaturas en el depósito, éstas continúan descendiendo linealmente hasta el comienzo del cambio de fase.

Aunque la temperatura de cambio de fase a presión atmosférica es 0°C, el agua necesita ser subenfriada para que se inicie la nucleación y se formen los primeros cristales de hielo y poder propagarse el cambio de fase a partir de estos. Hasta que se alcanza la temperatura de nucleación, el agua se encuentra por debajo de 0°C en estado metaestable.

Una vez se da la nucleación, la temperatura del PCM se eleva a 0°C en un intervalo de tiempo muy corto debido a la liberación de la entalpía del cambio de fase líquido-

sólido. El proceso de almacenamiento latente dura entre 16 y 22h para los ensayos a un 50% de capacidad. En la última fase de almacenamiento sensible en estado sólido, el hielo formado baja su temperatura, acercándose así a la temperatura del fluido caloportador.

El agua del depósito que no está bañando el intercambiador difícilmente logra cambiar de fase líquida a sólida. Se trata de los termopares de la regleta central, y en concreto al termopar inferior, que además de estar lejos del serpentín, está rodeado de agua más caliente que el resto del depósito.

La Figura 65 compara tres cargas con temperaturas de impulsión distintas. Estos ensayos comienzan con una temperatura del PCM de 12°C y la temperatura de impulsión más baja es la del ensayo llamado "C9", en el cual la zona latente finaliza antes que en los demás ensayos. En general, se puede observar que cuanto menor es la temperatura de impulsión del ensayo, más rápido es el proceso de carga.

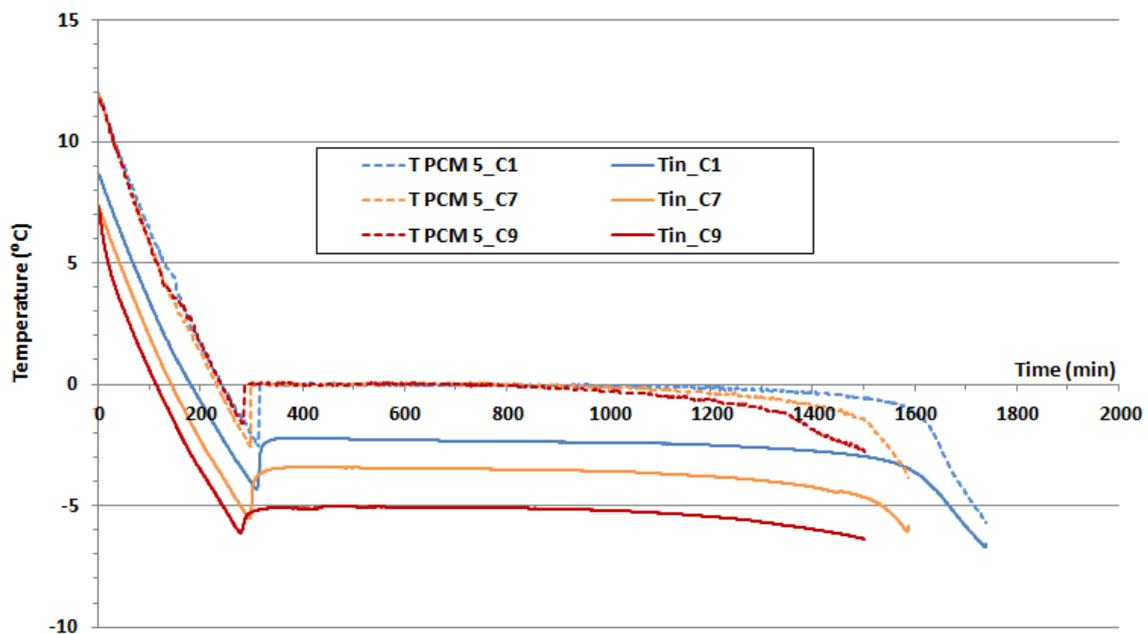


Figura 65. Comparación de tres ensayos de carga

La Figura 66 muestra la evolución de las temperaturas en las "triadas" superior e inferior. Los tubos inferiores son tubos de impulsión, luego tienen una temperatura menor. Los tubos superiores son en cambio de retorno, luego tienen una temperatura más cercana a la temperatura del PCM situado entre los tubos de impulsión y retorno. Cada tubo tiene una longitud de alrededor de 70m y las triadas están localizadas aproximadamente un metro antes del colector de impulsión o retorno.

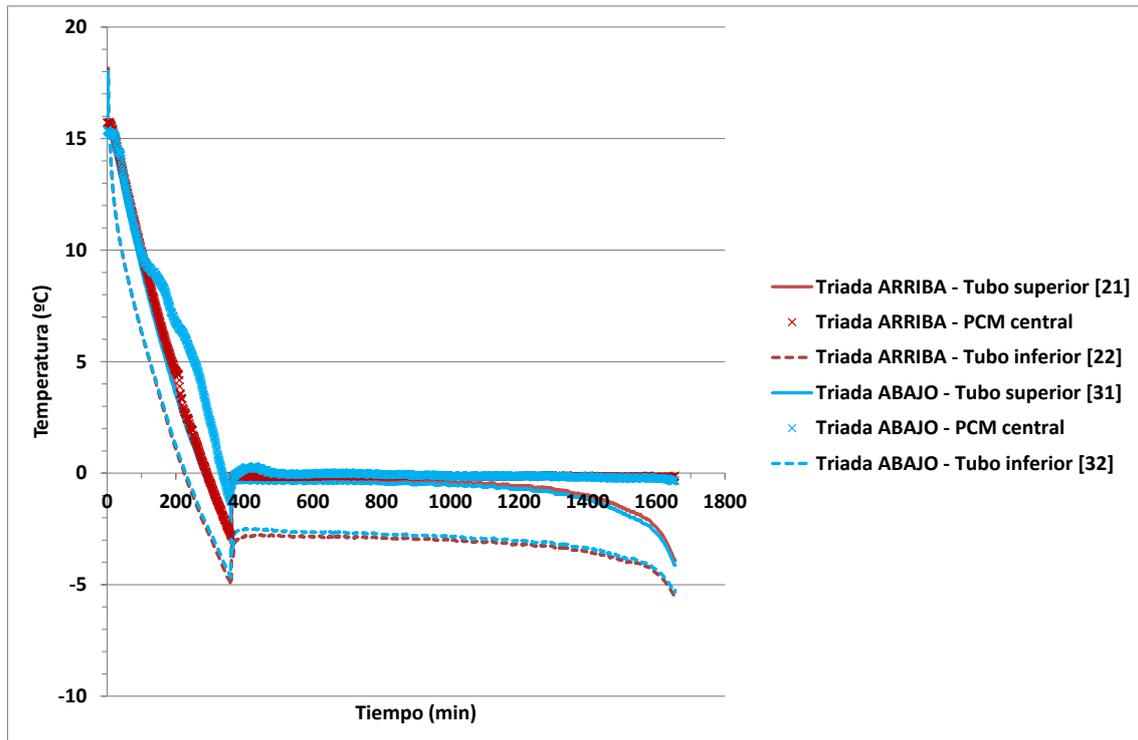


Figura 66. Temperaturas de las triadas superior e inferior (carga E1)

A partir de la Figura 66 se obtienen resultados importantes sobre la estratificación de temperaturas dentro del depósito CALMAC. Las temperaturas del fluido caloportador a medida que avanza por el serpentín se han representado antes y después de la inversión de densidad (Figura 67 y Figura 68), y durante el cambio de fase (Figura 69).

Antes de la inversión de densidad, el agua más caliente tiene una densidad menor y por ello se encuentra en la zona superior del depósito. Por ello, el fluido caloportador tiene un mayor calentamiento en los tubos superiores que en los inferiores del depósito (Figura 67).

Al contrario, tras la inversión de densidad entre 0°C y 4°C, el fluido más frío es el menos denso, y por tanto se halla en la parte superior del depósito. Así pues, el fluido caloportador tiene un menor calentamiento en las triadas superiores (Figura 68).

Finalmente, en la parte latente (Figura 69), las diferencias entre las triadas superiores e inferiores son menores pues, pese a que el hielo más frío es más denso, crece de forma concéntrica a los tubos y no se desprenden trozos de hielo durante la carga.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

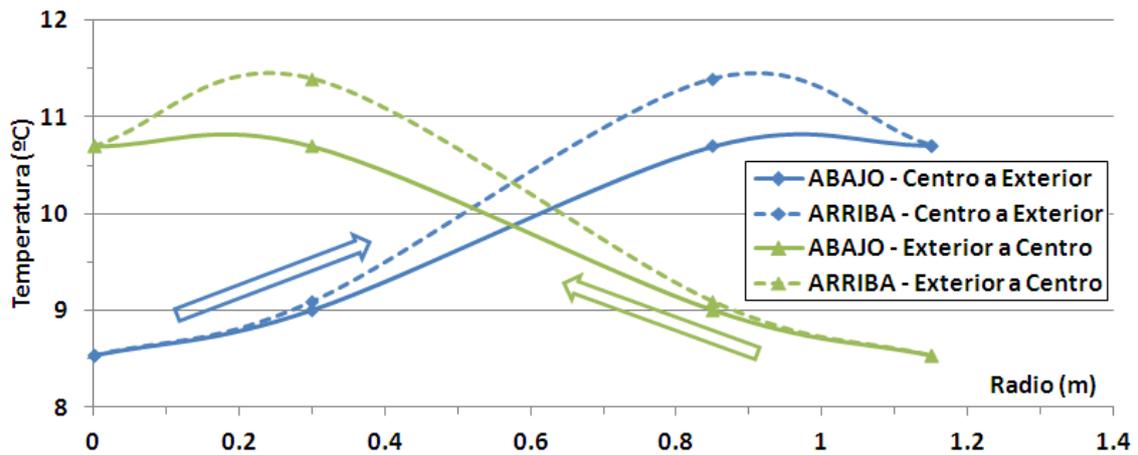


Figura 67. Temperatura del fluido caloportador en parte sensible, antes de la inversión de densidad (carga E1)

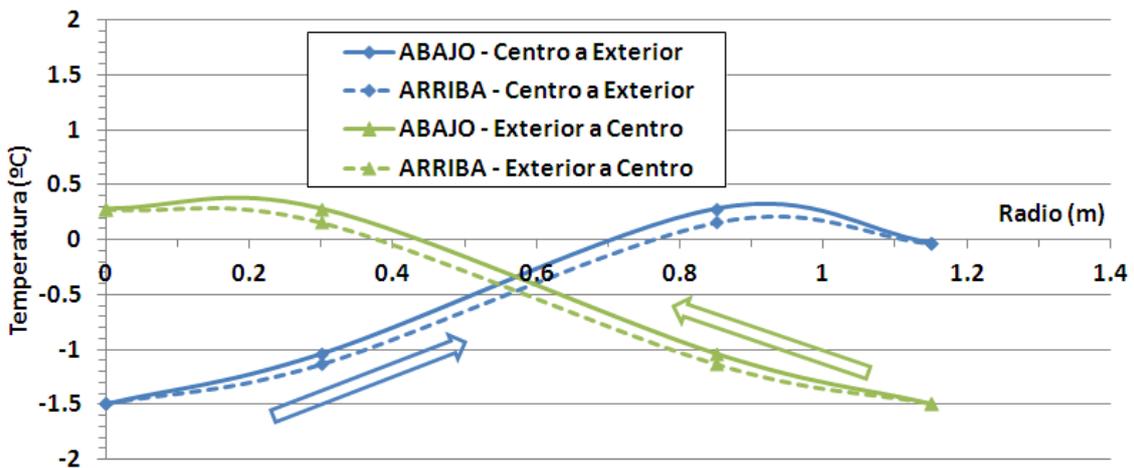


Figura 68. Temperatura del fluido caloportador en parte sensible, tras la inversión de densidad (carga E1)

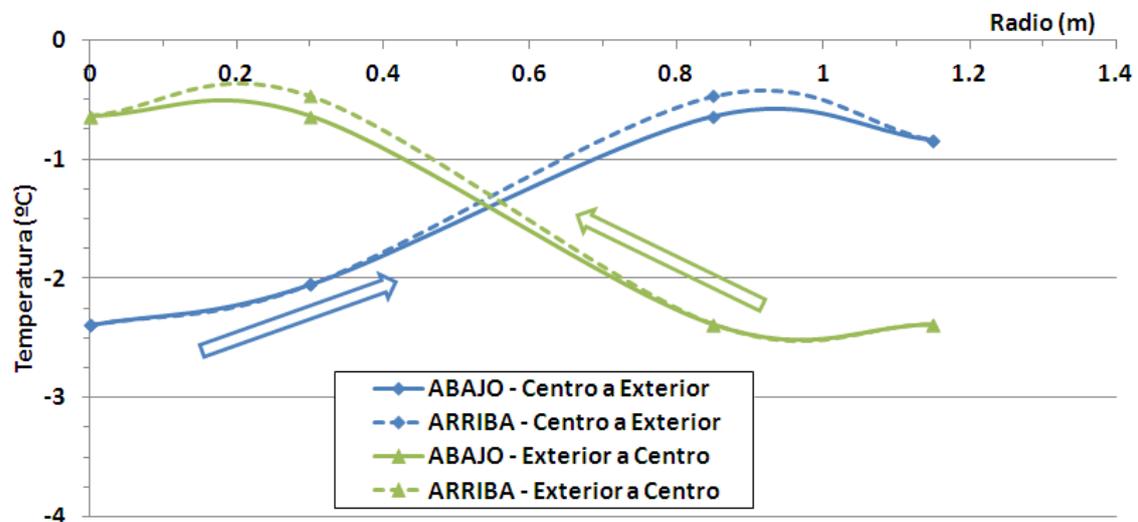


Figura 69. Temperatura del fluido caloportador en la parte latente (carga E1)

En la Figura 70 está representada la evolución del caudal a lo largo del ensayo E1. Como se puede apreciar, la disminución de la temperatura del líquido caloportador implica un aumento de la viscosidad y provoca un decremento del caudal trasegado por la bomba, puesto que la frecuencia de giro permanece fija durante todo el ensayo. A nivel porcentual sin embargo, el caudal disminuye únicamente en un 9% y el descenso se da principalmente en la parte sensible inicial que es donde hay un descenso mayor de las temperaturas. El caudal medio es el que ha sido utilizado para los cálculos y viene representado por la línea auxiliar. Se aprecia claramente que el caudal es prácticamente constante durante el cambio de fase.

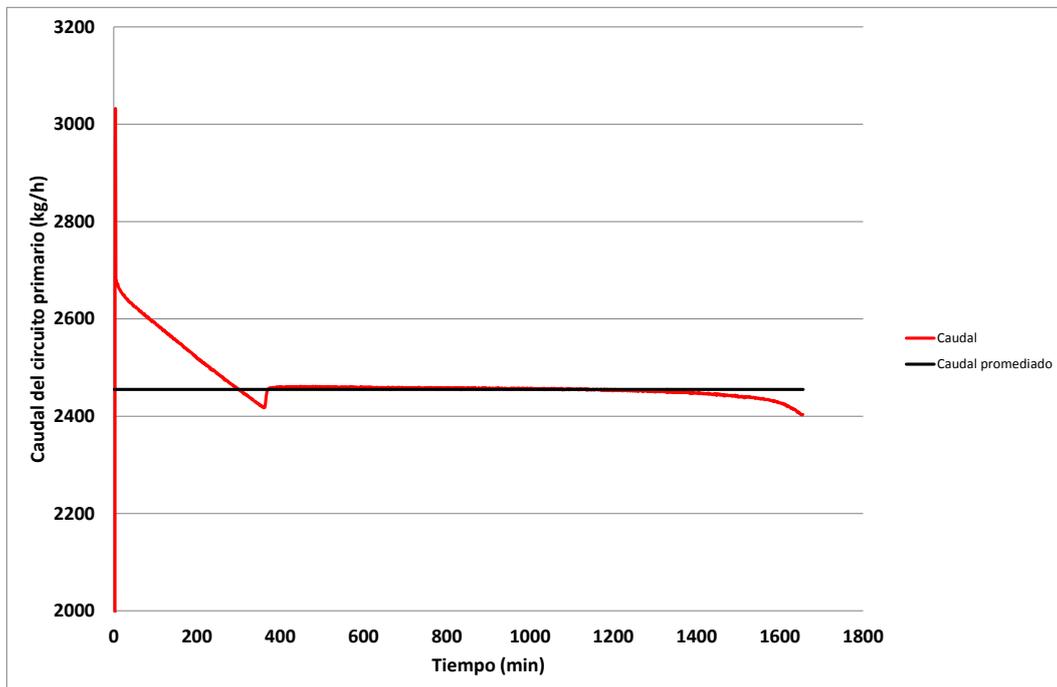


Figura 70. Caudal del bucle primario (carga E1)

En la Figura 71 se han representado las temperaturas del bucle frío, donde se aprecian las temperaturas del fluido caloportador en la entrada y salida del intercambiador de placas. Adicionalmente se muestran las temperaturas del depósito de inercia del circuito secundario. El agua fría proveniente del intercambiador del chiller entra al depósito por la toma superior y la bomba del secundario, que está siempre en circulación aspira el agua por la toma inferior. Al estar continuamente funcionando la bomba, la convección forzada predomina sobre la convección natural y por ello no se aprecia ninguna estratificación térmica.

Se observa además la temperatura a la que estaba fijado el “setpoint” del chiller (-11°C), temperatura que sólo se alcanza en este ensayo al final de la parte latente. A partir de dicho momento, el chiller empieza a ciclar con continuos arranques y paradas.

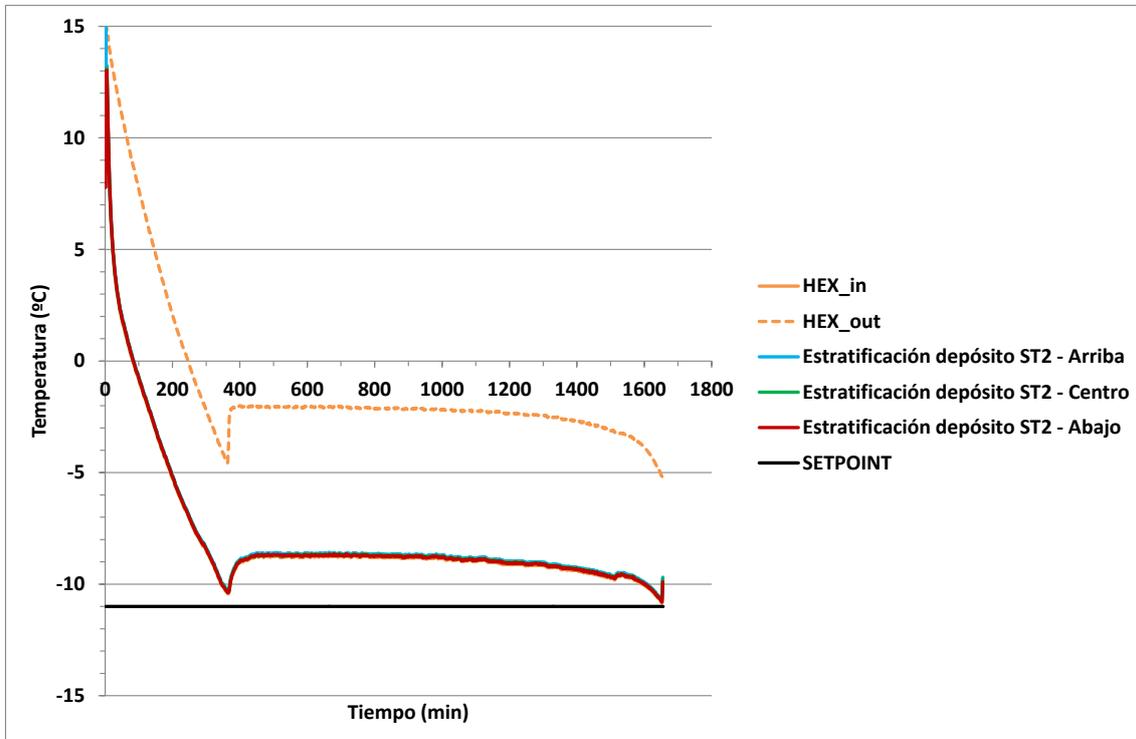


Figura 71. Temperaturas en el bucle secundario (carga E1)

En las próximas figuras se representan los parámetros registrados correspondientes al chiller. En concreto, en la Figura 72 se muestran las presiones de las líneas de alta y baja presión del chiller durante todo el ensayo. El chiller funcionó con un ratio de presiones de 7 durante toda la parte latente sin ciclar. Al final de esta parte latente cuando el control de la válvula de expansión no consigue mantener el recalentamiento del refrigerante a la aspiración del compresor, por lo que también varían las presiones a partir de este momento. Este problema se debía a que el PID de la válvula de expansión no regulaba bien cuando el setpoint era demasiado bajo y se resolvió posteriormente cambiando los parámetros del controlador.

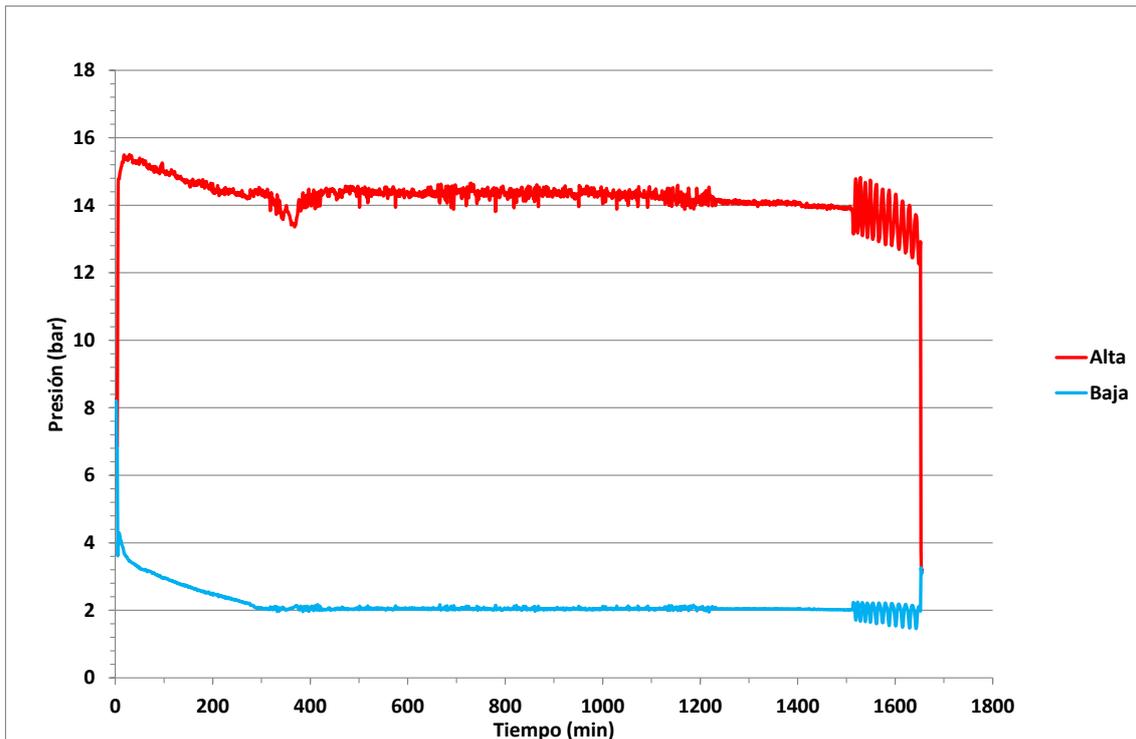


Figura 72. Presiones alta y baja del chiller (carga E1)

La Figura 73 muestra las temperaturas de entrada y salida del refrigerante y del fluido del circuito secundario en el evaporador del chiller, donde también se observan las oscilaciones que se dieron al final del ensayo por los problemas con la válvula de expansión ya mencionados. Cabe destacar que la posición de los termopares en el chiller es aproximada pues es difícil separar con precisión puntos tales como la entrada y salida del evaporador. Por tanto, estas medidas deben analizarse con precaución. Se observa cómo el fluido del circuito secundario se enfría tras su paso por el evaporador.

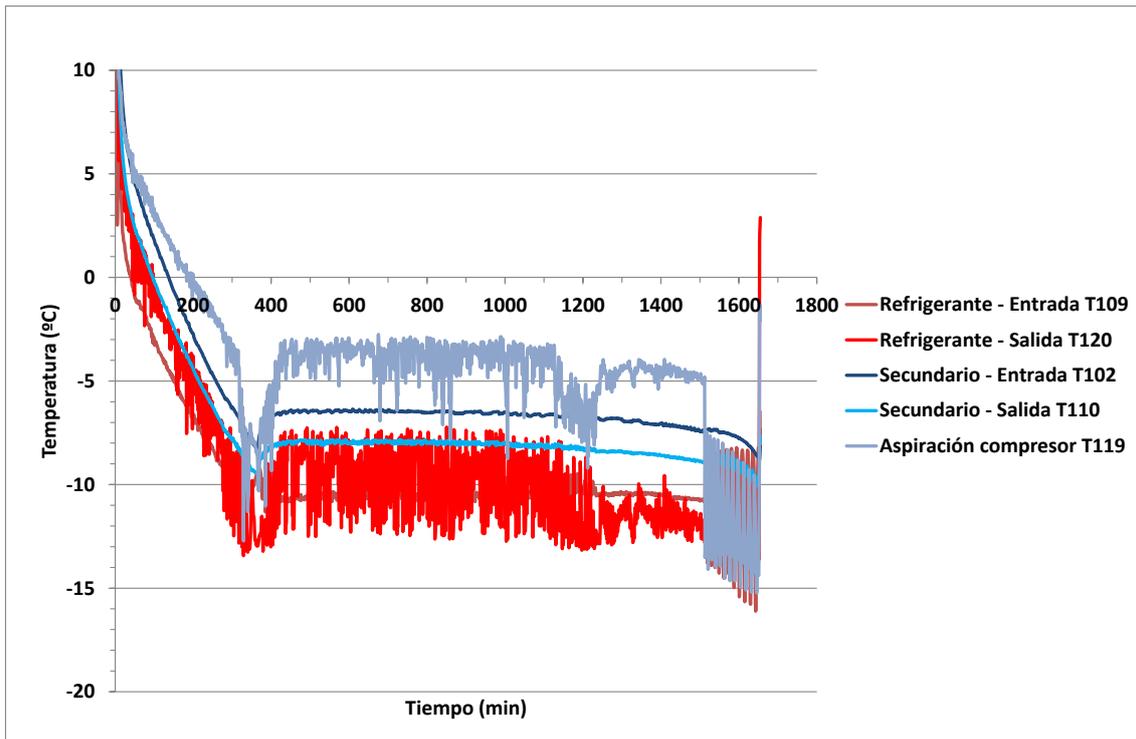


Figura 73. Temperaturas en el evaporador (carga E1)

La Figura 74 muestra la evolución de las temperaturas en el condensador del chiller, tanto del circuito frigorífico como del circuito del agua de condensación. La condensación se produce tomando agua del anillo de condensación a unos 21.5°C y se devuelve a una temperatura cercana a 27°C.

Finalmente, la Figura 75 muestra la potencia activa consumida por el chiller durante el ensayo y adquirida a través de un analizador de redes. Se comprueba una vez más que no llega a ciclar durante del ensayo, pues sólo alcanzó el “setpoint” una vez finalizado el intercambio latente. Durante todos los ensayos con capacidad de 138 kWh, el consumo del chiller es de 3.13 kW.

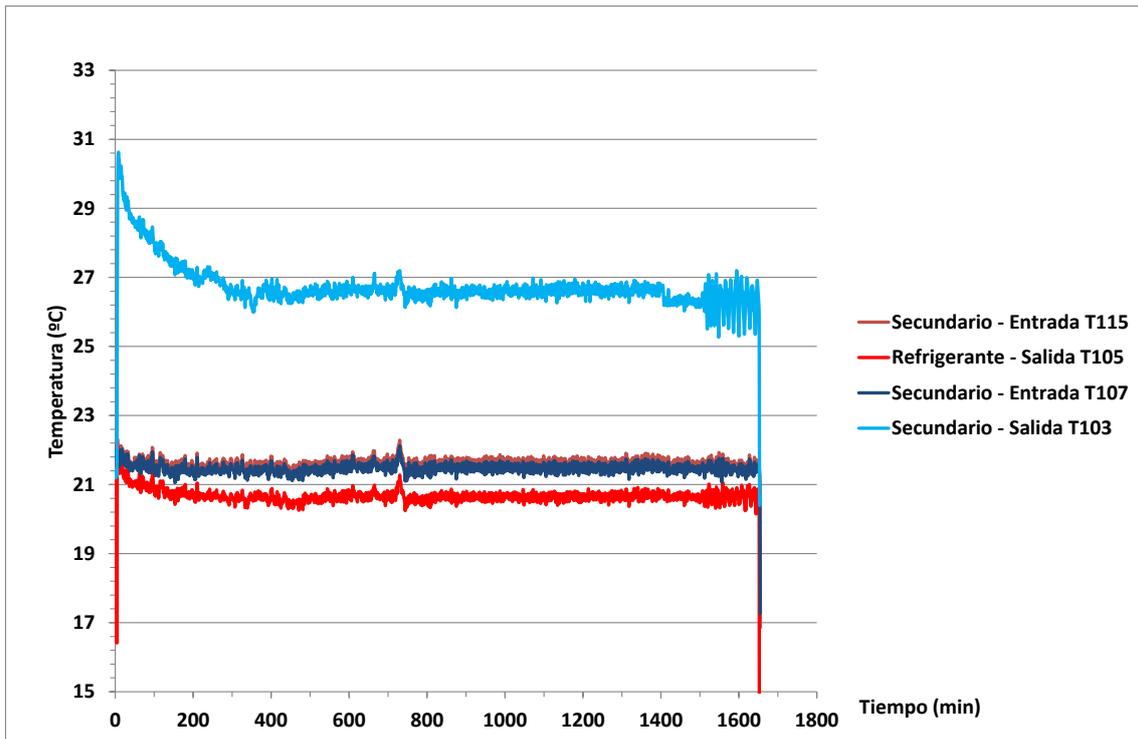


Figura 74. Temperaturas en el condensador (carga E1)

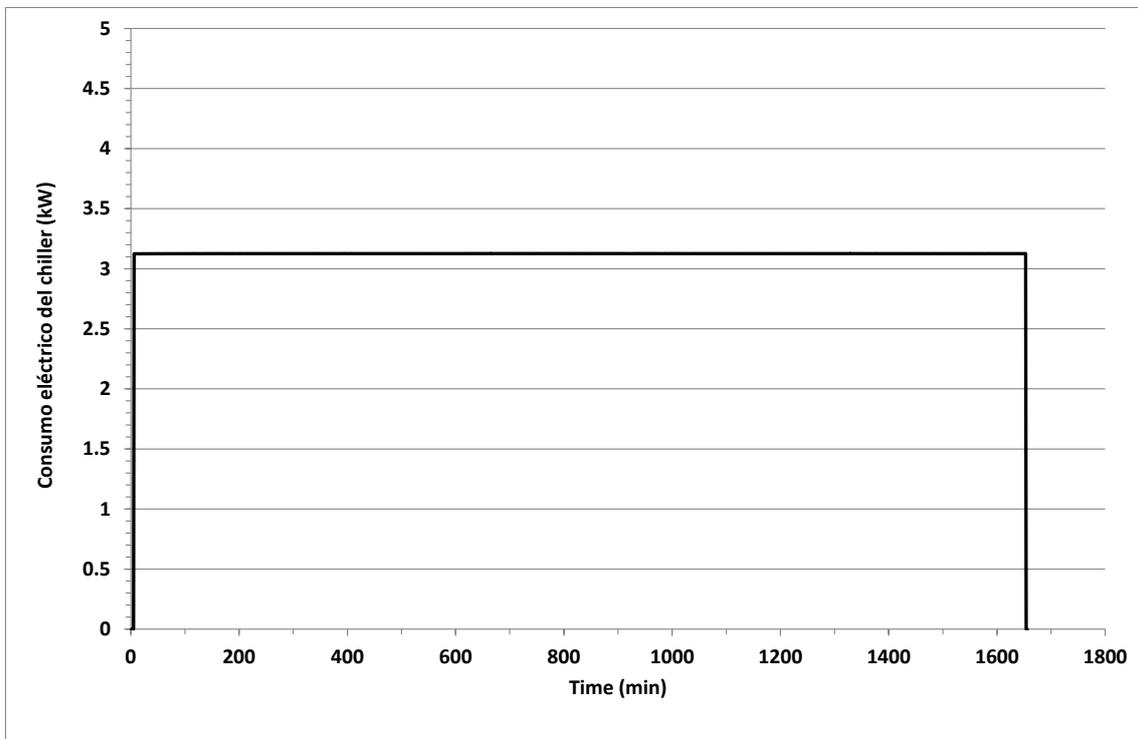


Figura 75. Potencia consumida por el chiller (carga E1)

7.3. Proceso de descarga

Las próximas figuras muestran las gráficas características de un proceso de descarga típico, el E2. En concreto, la Figura 76 representa la evolución de las temperaturas de las regletas interior y exterior del depósito CALMAC, así como las de entrada y salida del fluido caloportador.

A diferencia que en los procesos de carga, la temperatura de entrada al depósito CALMAC sí se ha podido mantener constante durante todo el ensayo. La potencia disponible para las descargas es del orden de tres veces la potencia del chiller, y por ello los ensayos son más cortos que las cargas.

En los procesos de descarga también es posible diferenciar tres zonas, aunque no tan claramente como en los procesos de carga. Esto se debe a que los procesos de desprendimiento de hielo son muy aleatorios, y durante aproximadamente 3 horas se desprenden bloques de hielo y ascienden debido a la diferencia de densidad entre el agua y el hielo, haciendo insignificante el efecto de la inversión de densidad. Como los bloques de hielo no se desprenden instantáneamente, es difícil detectar en los gráficos cuál es el límite exacto entre la parte latente y la parte sensible.

La Figura 76 muestra como prácticamente desde el principio se mantiene constante la temperatura de impulsión (10.8°C). El desprendimiento de hielo ocurre entre 200 y 400 minutos aproximadamente. Durante este intervalo, la temperatura de salida se mantiene por debajo de 7°C.

La Figura 77 muestra las temperaturas de las “triadas” superior e inferior y, aunque se puede comprobar que la temperatura de retorno siempre va aumentando, se aprecia en todos los ensayos como disminuye localmente cuando comienza el desprendimiento de bloques de hielo de la parte inferior, efecto mucho mayor que la propia inversión de densidad del agua.

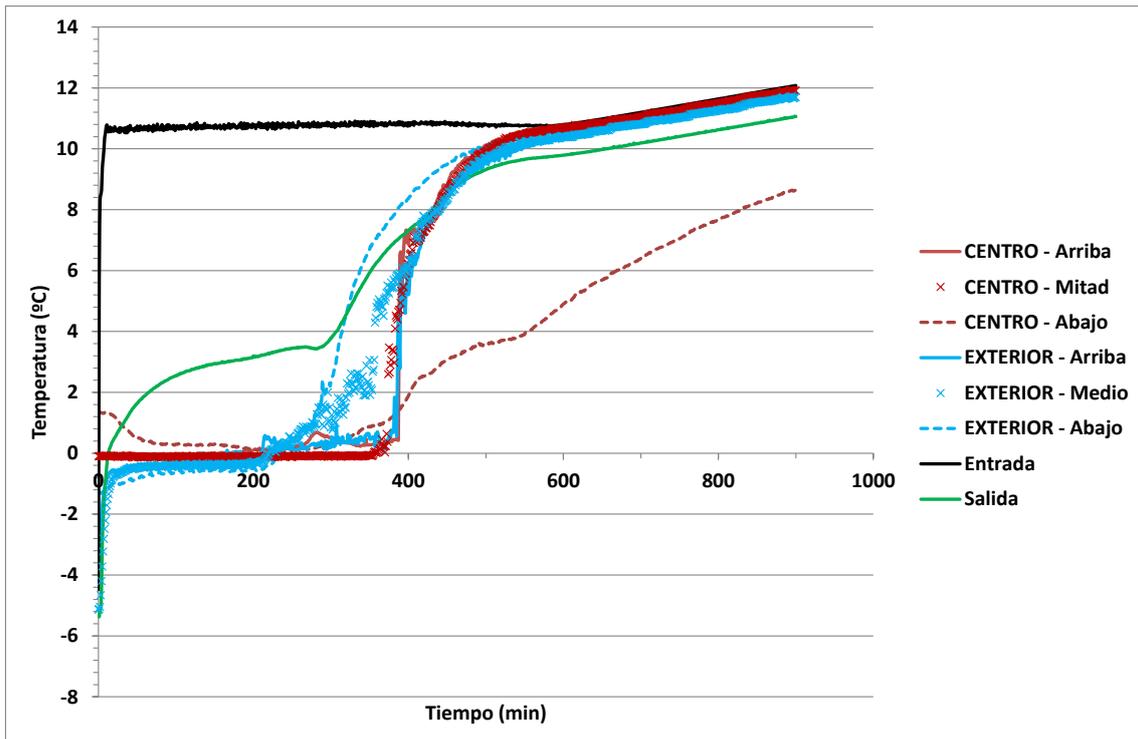


Figura 76. Temperaturas de las regletas interior y exterior (descarga E2)

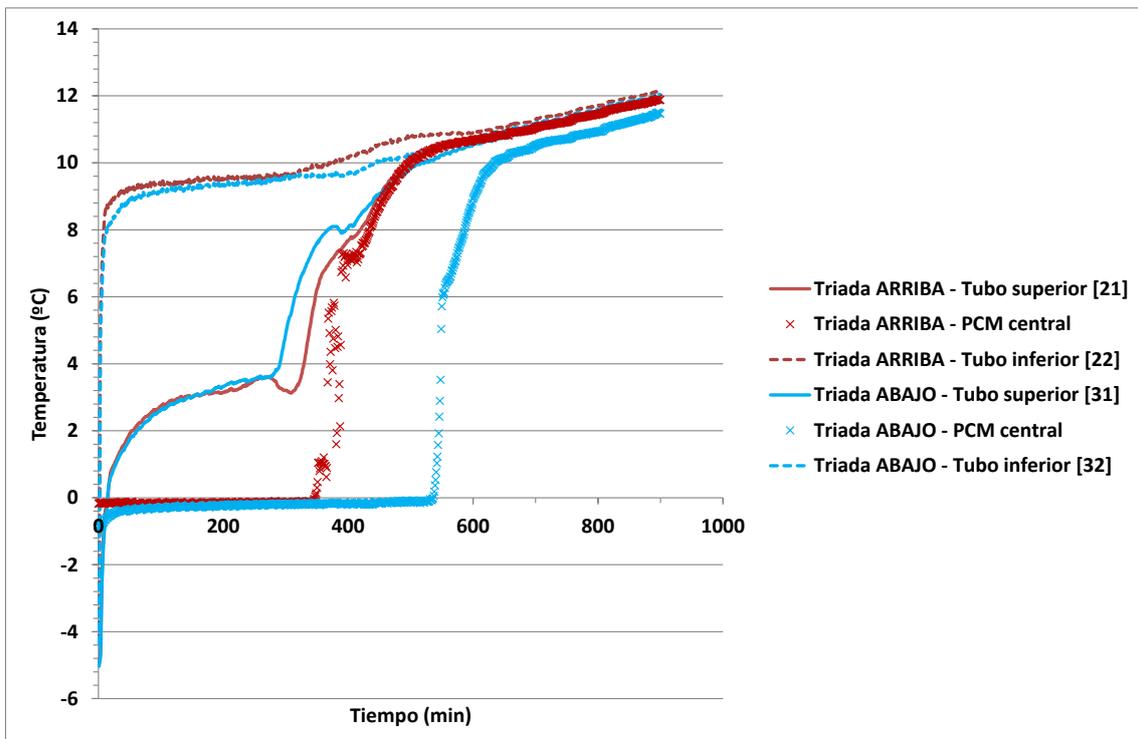


Figura 77. Temperaturas de las triadas interior y exterior (descarga E2)

En la Figura 78 se observa la evolución del caudal a lo largo del ensayo. Al igual que en las cargas, el caudal varía también con la misma tendencia que la temperatura del PCM. En los cálculos se ha utilizado el caudal medio, el cual se ha representado por la línea auxiliar.

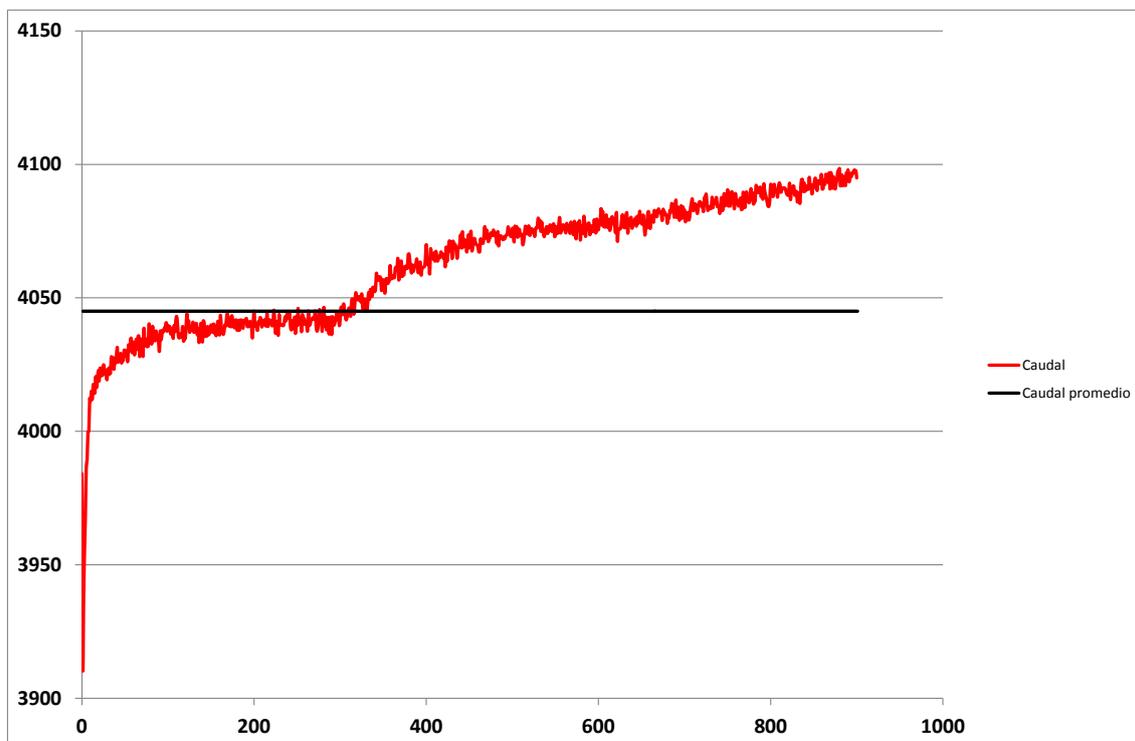


Figura 78. Caudal del bucle primario (descarga E2)

7.4. Comparación entre ensayos

En las tablas y figuras siguientes se resumen los resultados obtenidos en los distintos ensayos, primero los ensayos con 50 kWh de capacidad y a continuación los de 138 kWh. Las conclusiones de todos los ensayos se comentan en el apartado 7.4.

Como se puede apreciar en las Tablas Tabla 19 Tabla 23, el consumo eléctrico del chiller es mucho mayor que el de la bomba en los distintos ensayos. Por ello, en este tipo de instalaciones, la clave es intentar reducir al máximo el consumo energético del chiller.

BALANCE TÉRMICO CARGAS	e1	e3	e5	e1'	e3'	e5'	e1''	e3''	e5''
Caudal medio 1º (kg/h)	2752	3801	3266	3286	3821	2778	3496	3850	2798
T impulsión CALMAC media (°C)	-6.6	-4.4	-5.3	-5.0	-4.6	-5.2	-3.6	-3.4	-3.9
T retorno CALMAC media (°C)	-4.3	-3.0	-3.6	-3.4	-3.2	-3.5	-2.5	-2.4	-2.6
Tiempo de intercambio latente (h)	9.4	10.9	10.7	13.0	12.2	12.8	15.5	17.7	18.0

Tabla 17. Balance térmico de los ensayos de carga con 50 kWh

BALANCE TÉRMICO DESCARGAS	e2	e4	e6	e2'	e4'	e6'	e2''	e4''	e6''
Caudal medio 1º (kg/h)	3929	3890	3346	3756	3914	3887	3036	3015	3520
T impulsión CALMAC media (°C)	14.8	13.0	10.5	14.1	12.3	10.2	14.2	12.2	10.3
T retorno CALMAC media (°C)	12.0	10.3	8.0	11.2	9.6	8.1	10.6	9.4	8.0
Tiempo de intercambio latente (h)	6.0	6.1	6.3	5.5	4.9	6.3	5.4	6.7	6.4

Tabla 18. Balance térmico de los ensayos de descarga con 50 kWh

CONSUMOS ELÉCTRICOS CARGAS	e1	e3	e5	e1'	e3'	e5'	e1''	e3''	e5''
W elec bomba 1º (kWh)	2.0	4.7	3.3	4.0	5.3	2.8	5.5	7.8	4.0
W elec chiller (kWh)	29.2	34.0	33.3	29.9	29.4	28.4	27.1	32.2	30.5
W elec, total (kWh)	31.2	38.6	36.6	33.9	34.8	31.2	32.6	40.0	34.5
Frío almacenado CALMAC (kWh)	49.2	56.9	48.1	55.3	54.2	55.2	78.1	60.5	57.8
COP global (-)	1.58	1.47	1.31	1.63	1.56	1.77	2.40	1.51	1.67
Ratio funcionamiento chiller	1.00	1.00	1.00	0.74	0.77	0.71	0.56	0.58	0.54

Tabla 19. Análisis de los consumos de los ensayos de carga con 50 kWh

CONSUMOS ELÉCTRICOS DESCARGAS	e2	e4	e6	e2'	e4'	e6'	e2''	e4''	e6''
W elec bomba 1º (kWh)	2.8	2.8	2.0	2.3	2.3	2.9	1.4	1.7	2.3
W elec chiller (kWh)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W elec, total (kWh)	2.8	2.8	2.0	2.3	2.3	2.9	1.4	1.7	2.3
Frío recuperado (kWh)	68.4	66.4	37.5	36.2	32.3	37.1	32.8	37.6	36.8

Tabla 20. Análisis de los consumos de los ensayos de descarga con 50 kWh

En la Figura 79 se agrupan los resultados de los ensayos con 50 kWh de capacidad procedentes de las Tablas Tabla 17 y Tabla 18. Como se puede observar, cuanto mayor es la diferencia de temperaturas ente la impulsión y el cambio de fase (0°C), más rápidos son los ensayos de carga y descarga. En ambos procesos, cuanto mayor es el caudal más rápidos son los ensayos.

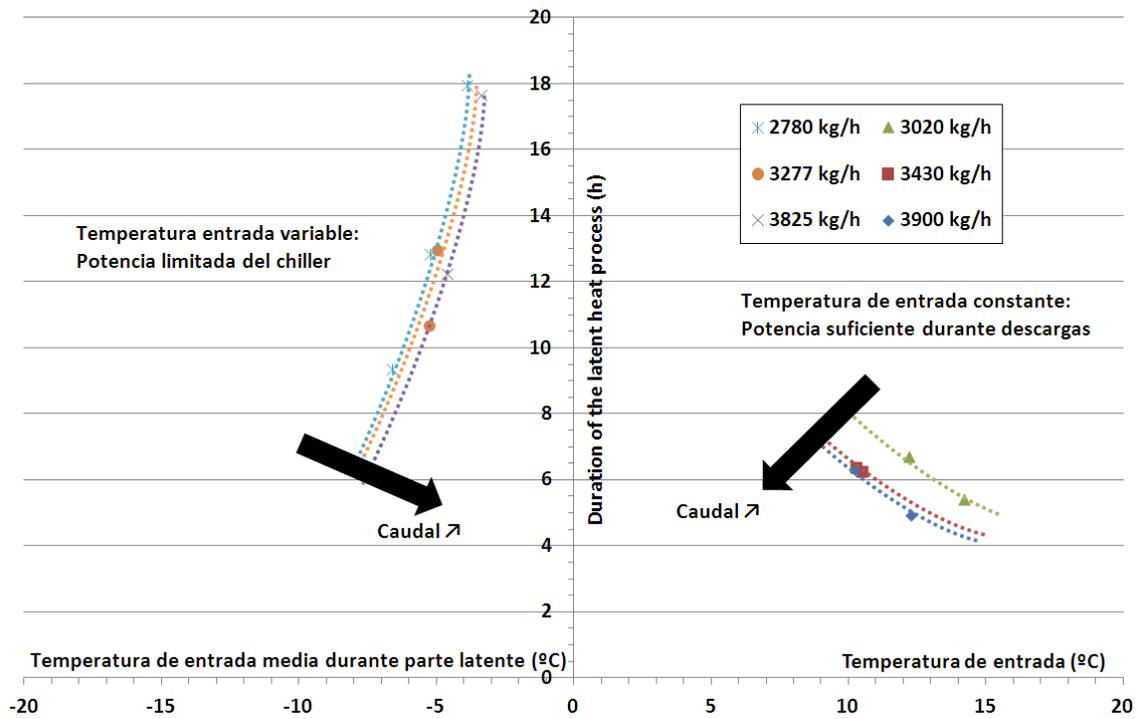


Figura 79. Duración de los ensayos de carga con 50 kWh de capacidad

BALANCE TÉRMICO CARGAS	E1	E3	E5	E1'	E3'	E5'	E1''	E3''	E5''
Caudal medio 1º (kg/h)	3850	3314	2618	3856	3510	2969	2454	1915	1574
T impulsión CALMAC media (°C)	-2.5	-2.9	-3.6	-2.5	-2.7	-3.1	-3.7	-4.5	-5.2
T retorno CALMAC media (°C)	-1.0	-1.2	-1.3	-0.8	-1.4	-1.3	-1.3	-1.1	-1.0
Tiempo de intercambio latente (h)	21.9	20.8	22.2	21.1	21.2	20.7	20.2	16.2	17.1

Tabla 21. Balance térmico de los ensayos de carga con 138 kWh

BALANCE TÉRMICO DESCARGAS	E2	E4	E6	E2'	E4'	E6'	E2''	E4''	E6''
Caudal medio 1º (kg/h)	4066	3514	2790	4077	3691	3134	4038	3479	2959
T impulsión CALMAC media (°C)	14.5	14.3	14.0	12.8	12.7	12.7	10.7	10.6	10.6
T retorno CALMAC media (°C)	4.2	3.7	2.5	8.1	2.8	2.4	3.0	2.1	2.3
Tiempo de intercambio latente (h)	3.7	4.7	5.5	11.8	4.0	5.4	5.8	5.0	7.0

Tabla 22. Balance térmico de los ensayos de descarga con 138 kWh

CONSUMOS ELÉCTRICOS CARGAS	E1	E3	E5	E1'	E3'	E5'	E1''	E3''	E5''
W elec bomba 1º (kWh)	18.1	13.1	8.0	18.2	14.8	10.4	7.0	4.5	3.4
W elec chiller (kWh)	68.5	65.1	69.2	65.9	66.0	64.8	63.0	50.6	53.4
W elec, total (kWh)	86.6	78.2	77.2	84.1	80.9	75.2	70.0	53.9	56.8
Frío almacenado CALMAC (kWh)	134.5	124.5	135.9	137.8	106.0	113.2	124.7	109.2	116.2
COP global (-)	2.0	1.9	2.0	2.1	1.3	1.5	2.0	2.0	2.0
Ratio funcionamiento chiller	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tabla 23. Análisis de los consumos de los ensayos de carga con 138 kWh

CONSUMOS ELÉCTRICOS DESCARGAS	E2	E4	E6	E2'	E4'	E6'	E2''	E4''	E6''
W elec bomba 1º (kWh)	4.8	3.1	3.0	4.9	3.5	2.7	4.7	3.0	2.8
W elec chiller (kWh)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W elec, total (kWh)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	3.0	2.8
Frío recuperado (kWh)	163.6	184.3	184.1	236.7	152.7	182.1	189.3	155.1	177.4

Tabla 24. Análisis de los consumos de los ensayos de descarga con 138 kWh

En la Figura 80 se agrupan los resultados de los ensayos con 138kWh de capacidad procedentes de las Tablas Tabla 21 y Tabla 22. Como se puede observar, cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el fluido caloportador y el cambio de fase (0°C), mayor es el potencial y por tanto más rápida es la reacción. En ambos procesos de carga y descarga, cuanto mayor es el caudal más rápidos son los ensayos

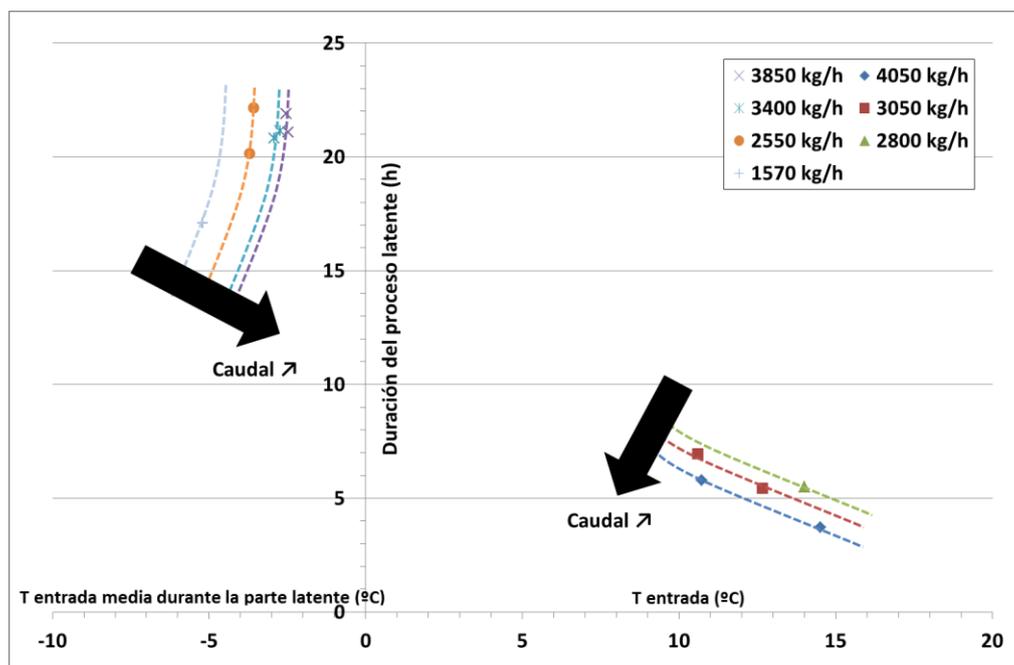


Figura 80. Duración de los ensayos de carga con 138 kWh de capacidad

También cabe destacar que, mientras que para una capacidad de 50 kWh las cargas durante entre 9 y 18 horas, para una capacidad mayor (138 kWh), las cargas duran entre 16 y 22h. Esto se debe a la pequeña capacidad del chiller (≈ 10 kW) y es por este motivo que no se han podido realizar cargas a temperatura de impulsión constante, ni realizar ensayos con una capacidad mayor al 50%.

Para finalizar, la Figura 81 recopila el consumo total de cada ensayo de carga, esto es el consumo del chiller más el de la bomba del circuito primario. El consumo de ésta última es mucho menor que el del compresor del chiller en todos los ensayos y depende de la duración del ensayo y del caudal trasegado. En general se cumple que los ensayos más largos son donde mayor consumo tiene la bomba.

Por otro lado, el consumo del chiller depende de la temperatura de evaporación y de la duración de la carga. En general, si la temperatura de evaporación disminuye, aumenta el consumo pero disminuye la duración del ensayo.

Esto implica que hay que encontrar un compromiso entre todas las variables de cara a encontrar el ensayo de menor consumo. Sin embargo, en una instalación real puede que interese realizar la carga en un tiempo menor a expensas de aumentar el consumo, bien por las características de la demanda o porque existe una diferencia en el precio de la energía eléctrica entre las horas pico y valle.

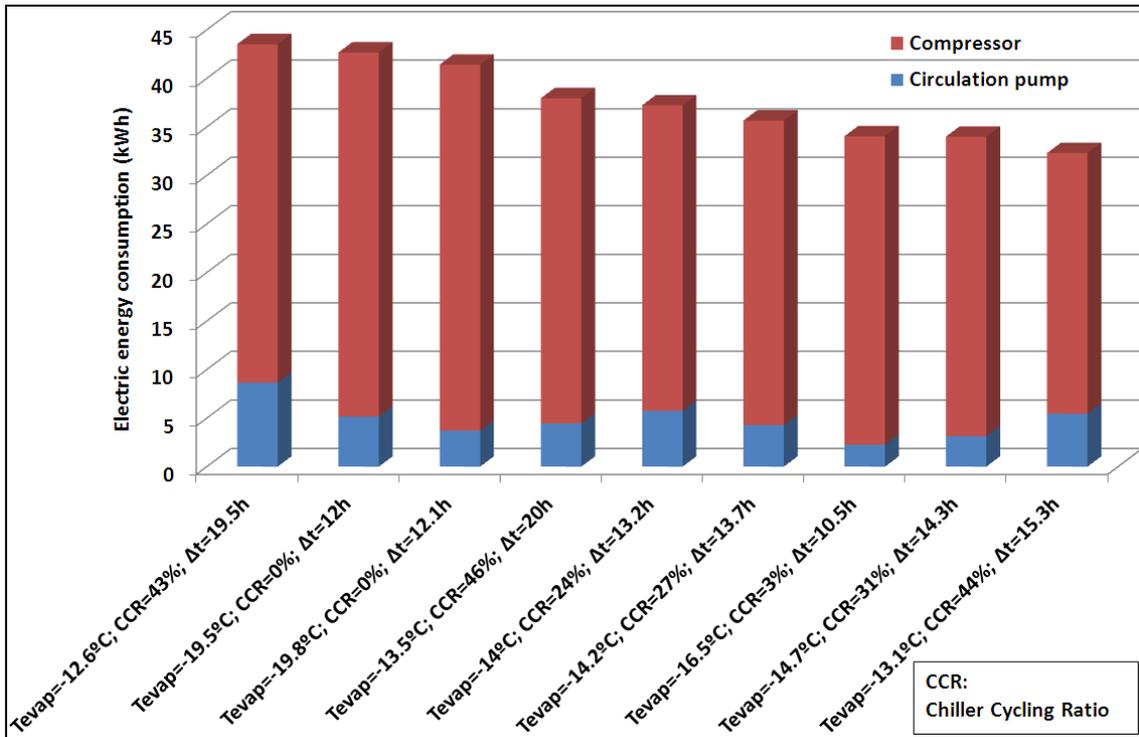


Figura 81. Comparación de los ensayos de carga

7.5. Conclusiones de los ensayos

7.5.1. Cargas

- Se ha comprobado experimentalmente que cuanto más baja sea la temperatura de entrada y mayor sea el caudal del fluido caloportador, más rápido es el proceso de carga.
- La temperatura de entrada no se ha mantenido constante para poder realizar cargas en menos de 30h. En una aplicación práctica las cargas se deberían hacer en un máximo de 10h, con un chiller de mayor potencia.
- A nivel energético, la carga con menor consumo eléctrico se ha dado para temperaturas de evaporación altas, con un caudal bajo pero suficiente para garantizar una suficiente convección del fluido caloportador. Por tanto, resulta clave la temperatura de evaporación sobre el COP del chiller. La bomba de

circulación tiene poco peso sobre el consumo energético total en comparación con el consumo del chiller.

- Se observan claramente los fenómenos de convección natural del agua debido a la variación de densidad según la temperatura. Cuanto mayor es el grado de carga del depósito, mayor es el efecto convectivo, que parece fomentar el que la nucleación se desarrolle desde dentro hacia el exterior del depósito. Sin embargo, para grados de carga bajos (50 kWh) la nucleación puede llegar a producirse de arriba hacia abajo del depósito.
- La nucleación se produce a temperaturas entre 0°C y -3.5°C. Para temperaturas mayores a -1.5°C, se observa que el proceso de formación de hielo es claramente más lento.

7.5.2. Descargas

- Se ha comprobado experimentalmente que cuanto más alta sea la temperatura de entrada y mayor sea el caudal del fluido caloportador, más rápidas son las descargas.
- La temperatura de entrada se ha podido mantener constante pues hay potencia suficiente para fundir el hielo almacenado, tanto en los ensayos a 50 kWh como en los ensayos a 138 kWh.
- El consumo energético es muy pequeño en las descargas pues se debe únicamente a la bomba de circulación (1.4 a 2.8 kWh pues además se hace a temperaturas más altas que en las cargas).
- Resulta difícil deducir un patrón único para las descargas pues los procesos de desprendimiento de hielo son muy aleatorios. Una vez empiezan a fundirse trozos de hielo, tienden a subir hacia arriba debido a su menor densidad comparada con la del agua líquida.
- Pese a que la temperatura del retorno del fluido caloportador siempre aumenta, en algunos tubos de la parte superior del depósito, puntualmente puede bajar la temperatura de retorno. Esto ocurre cuando suben trozos de hielo y sólo se puede apreciar en los serpentines superiores del depósito.
- Predomina el efecto convectivo. En las descargas, no se aprecia tanto la diferencia de densidad en el agua sino principalmente el efecto convectivo debido a la diferencia de densidad entre el hielo (sólido) y el agua (líquida). La inversión de densidad a 4°C se observa difícilmente en este caso pues predomina el movimiento ascendente del hielo.

8. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DEPÓSITO COMPACTO

En el presente capítulo queda resumido el trabajo realizado para diseñar y construir un depósito compacto de almacenamiento de energía térmica con PCMs. La Figura 82 sintetiza el proceso seguido hasta concebir el resultado final.

Como primera fase, se han definido las especificaciones en función del objetivo del proyecto, el cual es diseñar un depósito más compacto que el de CALMAC y además ser capaz de trabajar en un rango de temperaturas más amplio y con PCMs de naturaleza distinta a la del agua.

En la fase de diseño conceptual, se ha partido de las especificaciones generadas anteriormente para analizar las posibles soluciones que existen en el mercado, y éstas se han ido acotando progresivamente al fijar criterios como el coste del cambio del PCM o el tipo de geometría del intercambiador de calor, hasta que finalmente se ha alcanzado una solución para la vasija y para el intercambiador.

A lo largo de la etapa de diseño de detalle, han sido dimensionados todos los componentes del depósito compacto y se han desarrollado los planos que se deberán seguir durante la fase de construcción, en la que se han fabricado y ensamblado todos los componentes del depósito compacto.



Figura 82. Resumen del proceso de diseño del depósito COMPACTO

8.1. Definición de especificaciones

El concepto de partida ha sido diseñar un depósito de menor escala que el ya ensayado depósito de CALMAC, con una capacidad energética asequible para las instalaciones del laboratorio del IIE y que reduzca la duración de los ensayos de caracterización de los PCMs.

En consecuencia, y con el fin de obtener unos resultados extrapolables a depósitos comerciales de mayor capacidad, se propuso un depósito con un intercambiador igual al modelo 1098C de CALMAC pero con un número menor de filas de tubos, tal y como muestra la Figura 83. Este boceto quedó descartado por el elevado volumen de PCM

que albergaría (más de 700l), factor que encarecía demasiado cada ensayo (más de 2500€ por PCM ensayado).

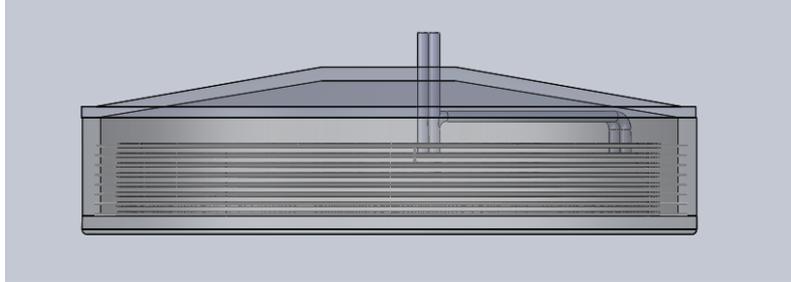


Figura 83. Idea inicial para el depósito compacto de PCMs

Además, el depósito a fabricar deberá trabajar con unos materiales y amplio rango de temperaturas. La Tabla 25 resume los PCMs y sus respectivos puntos de fusión a ensayar con el depósito COMPACTO, información que se ha tenido en cuenta a la hora de establecer las especificaciones técnicas del depósito a diseñar.

Temperatura cambio de fase (°C)	Material
0	Agua/hielo
7-10	Polietilenglicol
50-65	Parafina
80-95	Parafina
20-25	Parafina

Tabla 25. Resumen de PCMs a ensayar en el depósito compacto

Partiendo de esta primera propuesta, y una vez conocido al detalle el funcionamiento del depósito de CALMAC, se han concretado los siguientes criterios de diseño del depósito a construir:

CRITERIOS DE DISEÑO
<ul style="list-style-type: none">• Volumen PCM < 300 L• Coste cambio PCM < 1200 €• Ratio Volumen/Superficie exterior similar al depósito CALMAC• Intercambiador de cobre recocido• Colectores de cobre• Distancia entre tubos similar a CALMAC• Diámetro interno/externo similar a CALMAC• Menor longitud por tubo que CALMAC• Punto de drenaje para el PCM• Intercambiador extraíble

Tabla 26. Criterios de diseño para el depósito COMPACTO

Las pérdidas de calor del depósito son directamente proporcionales a la superficie exterior del mismo. Así pues, se ha decidido mantener la misma compacidad (ratio volumen/ $A_{\text{depósito}}$) con el objetivo de tener pérdidas similares por unidad de volumen.

El volumen disponible para el PCM se ha limitado a 300 l, para así obtener un coste de cambio del PCM inferior a 1200 €.

Al contrario que el depósito de CALMAC, se ha seleccionado el cobre recocido como el material más idóneo para el serpentín interno, dada su maleabilidad, su capacidad para trabajar temperaturas a elevadas y la mayor experiencia en el laboratorio del IIE trabajando con este.

Con el fin de hacerlo más compacto, también se ha decidido reducir la longitud total de cada espiral. Así pues, el diámetro del depósito del IIE tendrá un diámetro inferior al de CALMAC, pero con un diámetro de tubos y distancia entre los mismos similar. De esta manera, los procesos de transmisión de calor de los tubos al PCM son similares y se pueden extrapolar los resultados a depósitos de mayor capacidad.

Finalmente, también se ha fijado como objetivo mejorar la facilidad del cambio de PCM. El depósito a construir deberá disponer de un drenaje en la parte inferior, y tener una tapa superior que permita fácilmente extraer el intercambiador de calor para limpiar todo antes de cambiar el PCM, así como un registro que facilite la inspección del depósito en caso que sea necesario.

Así pues, siguiendo los criterios definidos anteriormente, las características técnicas del depósito a fabricar son las descritas en la Tabla 27.

CARACTERÍSTICAS DEPÓSITO COMPACTO	VALOR
Capacidad con agua como PCM (kWh)	14
Altura (mm)	410
Ancho (mm)	950
Volumen total (m ³)	0.290
Volumen PCM (m ³)	0.151
Volumen de agua-etilenglicol (m ³)	0.015
Diámetro externo tubos (mm)	16
Nº tubos	8
Área HEX (m ²)	4.8
Ratio m ² HEX/m ³ PCM	31.6
Longitud tubos (m)	9.50
Nº vueltas	8
Distancia exterior entre tubos (mm)	28
Coste total del depósito (€)	5000
Potencia media carga (kW)	1.2
Potencia máxima carga (kW)	3.50
Facilidad evacuación PCM	SÍ

Tabla 27. Especificaciones técnicas para el depósito COMPACTO

8.2. Diseño conceptual

Basado en los criterios de diseño descritos en el apartado anterior, se ha realizado un estudio de los depósitos disponibles comercialmente que podrían tener aplicación como vasija del depósito COMPACTO. También se ha solicitado presupuesto a distintos fabricantes para recopilar un mayor número de opciones distintas.

La Figura 84 ilustra cómo es el depósito que se ha buscado una vez definidas las especificaciones técnicas de la Tabla 27. A nivel comercial existe una amplia gama de soluciones, cada una con características distintas en cuanto a su geometría, capacidad y materiales utilizados.

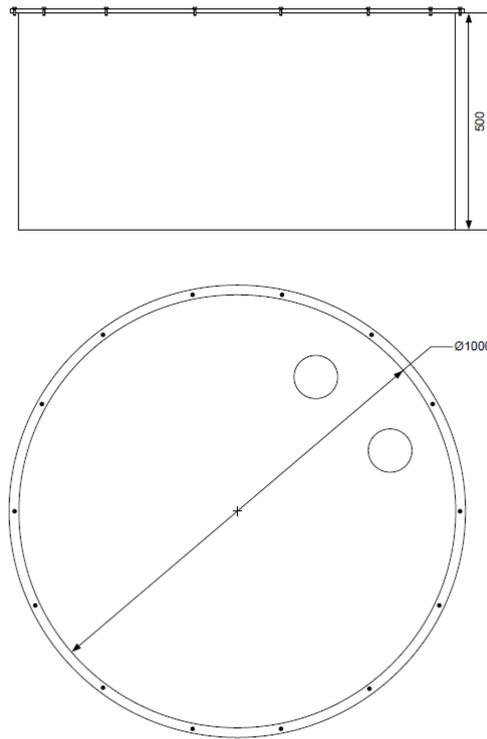


Figura 84. Croquis inicial del depósito

En la Tabla 28 se resumen los distribuidores o fabricantes, precio y materiales de cada solución estudiada, así como sus dimensiones.

Material depósito	T _{max} (°C)	H (mm)	D (mm)	Precio (€)	Capacidad (con agua con PCM) (kWh)	Distribuidor/ Fabricante
POLIETILENO 1	60	1335	950	133	16.6	ADIAGUA
POLIETILENO 2	60	1050	1020	118	20.3	ADIAGUA
POLIETILENO 3	80	778	455	59	9.3	SUNBOX
POLIETILENO 4	80	980	410	40	9.6	SUNBOX
POLIPROPILENO	80	700	610	844	6.8	INCAPLAS S.A.
PVDF	130	500	1000	2308	18.3	INCAPLAS S.A.
INOX AISI 304	-	500	1000	800	18.3	PROMINOX SLL
INOX AISI 316	-	500	1000	960	18.3	PROMINOX SLL
BIDÓN 1	-	920	610	45	20.1	Bidones Graells
BIDÓN 2	-	880	580	0	17.5	IIE

Tabla 28. Resumen de las opciones a estudiar para la fabricación del depósito

A continuación se ha analizado la viabilidad de cada depósito como recipiente del material de cambio de fase y del intercambiador de calor. En concreto, para cada uno se ha estudiado cuántos metros de intercambiador de calor podría alojar, respetando tanto la sección del tubo del depósito de CALMAC como las distancias entre tubos en los planos horizontal y vertical.

Cabe destacar que de las soluciones planteadas, los fabricantes INCAPLAS y PROMINOX ofrecen depósitos a medida con el sistema de cierre de la tapa superior y de drenaje ya incorporado. Esto es una ventaja importante a tener en cuenta con respecto al resto de soluciones.

Finalmente, además de las dimensiones de cada depósito, también influirán en la elección final el tipo de ensayos a realizar, pues no todos los materiales son capaces de soportar temperaturas cercanas a 100°C sin alterar sus propiedades mecánicas.

A continuación se analiza cada una de las posibles opciones:

- POLIETILENO 1

Se trata del primero de las dos ofertas que propone la empresa ADIAGUA. Esta opción queda descartada debido a su temperatura máxima de trabajo y por tratarse de un depósito cónico, lo que implicará problemas constructivos a la hora de reducir su altura y tratar de aprovechar la tapa comercial. Igualmente, el intercambiador de calor se debería de ceñir al diámetro menor, disminuyendo su potencia y aumentando la duración de los ensayos.

- POLIETILENO 2

La segunda opción que propone la empresa ADIAGUA es un depósito comercial de las mismas características técnicas que el anterior pero cilíndrico, lo que sí que permitiría modificar su altura sin tener que alterar las dimensiones de su cierre. Sin embargo, queda descartada su utilización por no soportar tampoco temperaturas superiores a 60° C.

- POLIETILENO 3 Y 4

La empresa SUNBOX dispone de dos recipientes comerciales de polietileno de alta densidad que poseen una temperatura máxima de trabajo elevada, pero que sus dimensiones no se acoplan a los requisitos de diseño.

En la Figura 85, se ha representado la distribución teórica del serpentín en éstos depósitos en función de las especificaciones técnicas fijadas. Se puede comprobar que ambas soluciones tendrían claramente una transmisión de calor muy

deficiente alrededor del PCM, pues no es posible ni si quiera completar una vuelta completa; y por tanto alargarían sustancialmente los procesos de carga y descarga.

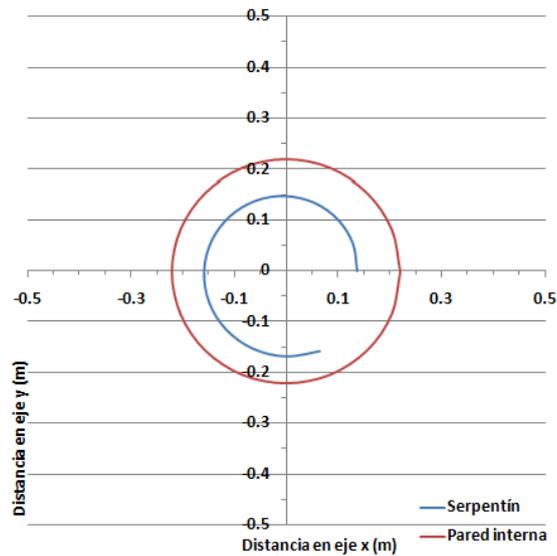


Figura 85. Esquema de la distribución del serpentín en POLIETILENO 3 y 4

- POLIPROPILENO

La empresa INCAPLAS es experta en fabricación de depósitos plásticos a medida y propone dos soluciones distintas, una en PEHD y otra en PVDF.

La primera de ellas se trata de un depósito de polietileno fabricado a partir de una tubería comercial de 10 mm de espesor, por lo que la única dimensión que se puede variar es la altura.

Esta solución podría tener una transmisión de calor mala alrededor del PCM y por tanto alargar los procesos de carga y descarga. Esta opción queda descartada además, por no ser capaz de trabajar de forma continua a temperaturas superiores a 80° C.

- PVDF

La segunda opción planteada por INCAPLAS S.A. se trata de un depósito hecho a medida con un plástico muy resistente a las altas temperaturas y a materiales corrosivos.

- INOXIDABLE 1 Y 2

La empresa PROMINOX es experta en la fabricación de depósitos de acero inoxidable a medida, propone dos soluciones iguales geoméricamente utilizando

dos aceros distintos, AISI 304 y 316. La única diferencia entre ellos es el tipo de acero inoxidable, pues el primero se utiliza para depósitos en la industria alimenticia y el segundo para materiales corrosivos en la industria química.

- **BIDÓN 1**

La empresa Bidones Graells dispone de un barril metálico comercial que al ser de un diámetro menor que el deseado, implicaría utilizar una gran cantidad de tubos de menor diámetro, algo que complicaría su construcción.

- **BIDÓN 2**

Por último, esta opción se basa en reutilizar uno de los dos depósitos que contenía el glicol que se ha comprado para la instalación de PCMs en el laboratorio del IIE. Al igual que en otros depósitos con un pequeño diámetro, esta solución tendría una transmisión de calor mala alrededor del PCM.

Tras el análisis de todas las soluciones posibles, la Tabla 29 resumen las prestaciones que ofrece cada una de las opciones consideradas en éste estudio. Muchas de las posibilidades han sido descartadas por no cumplir alguno de los requisitos fundamentales.

Material depósito	T_{max}	Dimensiones	Compatibilidad materiales	Precio
POLIETILENO 1	-	-	-	+
POLIETILENO 2	-	-	-	+
POLIETILENO 3	-	-	-	+
POLIETILENO 4	-	-	-	+
POLIPROPILENO	-	+	-	+
PVDF	+	+	+	-
INOX AISI 304	+	+	+	+
INOX AISI 316	+	+	+	+
BIDÓN 1	+	-	+	+
BIDÓN 2	+	-	+	+

Tabla 29. Resumen de las prestaciones de cada opción

Las soluciones que se retienen en la primera selección:

- PVDF
- INOX AISI 304
- INOX AISI 316

La elección final depende de la capacidad que se desee para el depósito, la temperatura máxima que se desee alcanzar, el tipo de materiales a ensayar y el precio del depósito.

La solución en PVDF es la solución ideal por sus características mecánicas y químicas, pero supone un coste muy elevado comparado con el resto de soluciones, por lo que **se ha decidido fabricar el depósito COMPACTO en acero inoxidable AISI 316, por ser la opción que satisface todos los requisitos con un menor coste.**

Para terminar la fase de diseño preliminar, se ha planteado la distribución del serpentín dentro de la vasija de acero inoxidable según las especificaciones técnicas tal y como muestra la Figura 86, y se han calculado las prestaciones del depósito COMPACTO al utilizar esta opción, como muestra la Tabla 30.

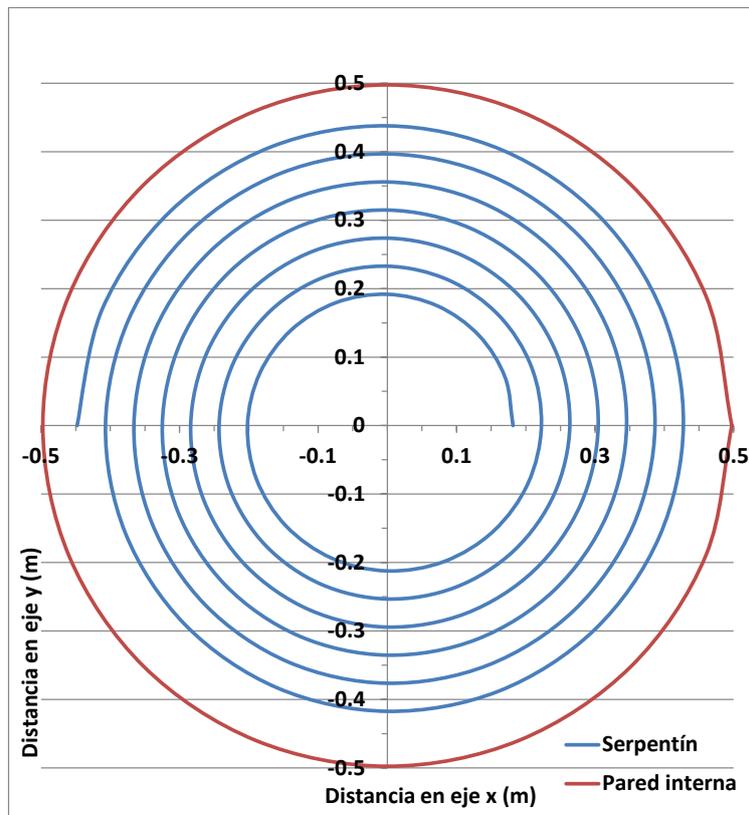


Figura 86. Distribución del serpentín en el depósito COMPACTO

Longitud tubos	13.55	m
nº tubos vertical	8	-
Volumen total	0.251	m ³
Volumen PCM	0.197	m ³
Capacidad (PCM=agua)	18.3	kWh
Caudal mínimo	0.94	m ³ /h
Caudal máximo	4.71	m ³ /h

Tabla 30. Resumen de las prestaciones del depósito COMPACTO

8.3. Diseño de detalle

En este apartado se resume el proceso de diseño de detalle del depósito COMPACTO. El objetivo ha sido desarrollar el producto partiendo de las especificaciones fijadas durante los apartados anteriores y plasmar el resultado final en unos planos para poder proceder a su construcción.

La Figura 87 muestra el despiece de la vasija que se ha ordenado construir a PROMINOX para que construya en acero inoxidable AISI 316. Se puede observar que se ha incluido un sistema de drenaje para el PCM, una tapa y un registro desmontables. La Figura 88 muestra el conjunto de la vasija con la capa de aislamiento, la cual está formada por poliuretano de 150 mm de espesor y permite trabajar con PCMs a 100°C en su interior.

El diseño de la vasija y del conjunto intercambiador más colectores permite la extracción del serpentín para su correcta instrumentación y mantenimiento, como se puede observar en la Figura 89. Para facilitar la extracción, se ha diseñado también una estructura sobre la que ha montado el intercambiador de calor y los colectores y que muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Finalmente, con el objetivo de mantener el espacio entre tubos tanto en el plano vertical como en el horizontal, se ha diseñado un sistema de separación de tubos a base de veinticinco pletinas como la de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y que una vez ensamblados todos los tubos, se habrán de soldar entre sí para limitar al máximo el movimiento entre tubos. Tanto las pletinas como la estructura para el intercambiador de calor han sido encargadas a PROMINOX en acero AISI 316.

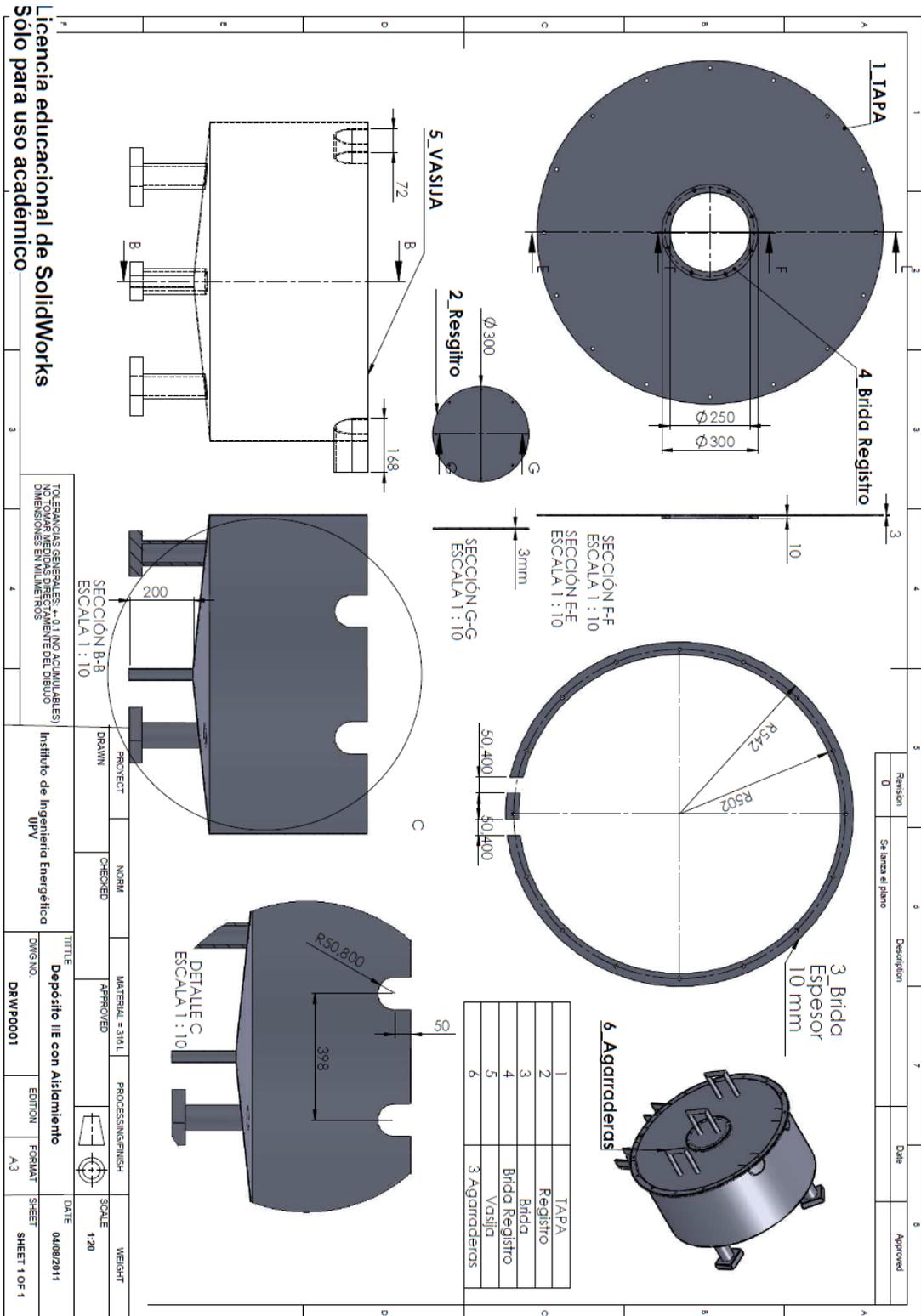


Figura 87. Despiece de la vasija

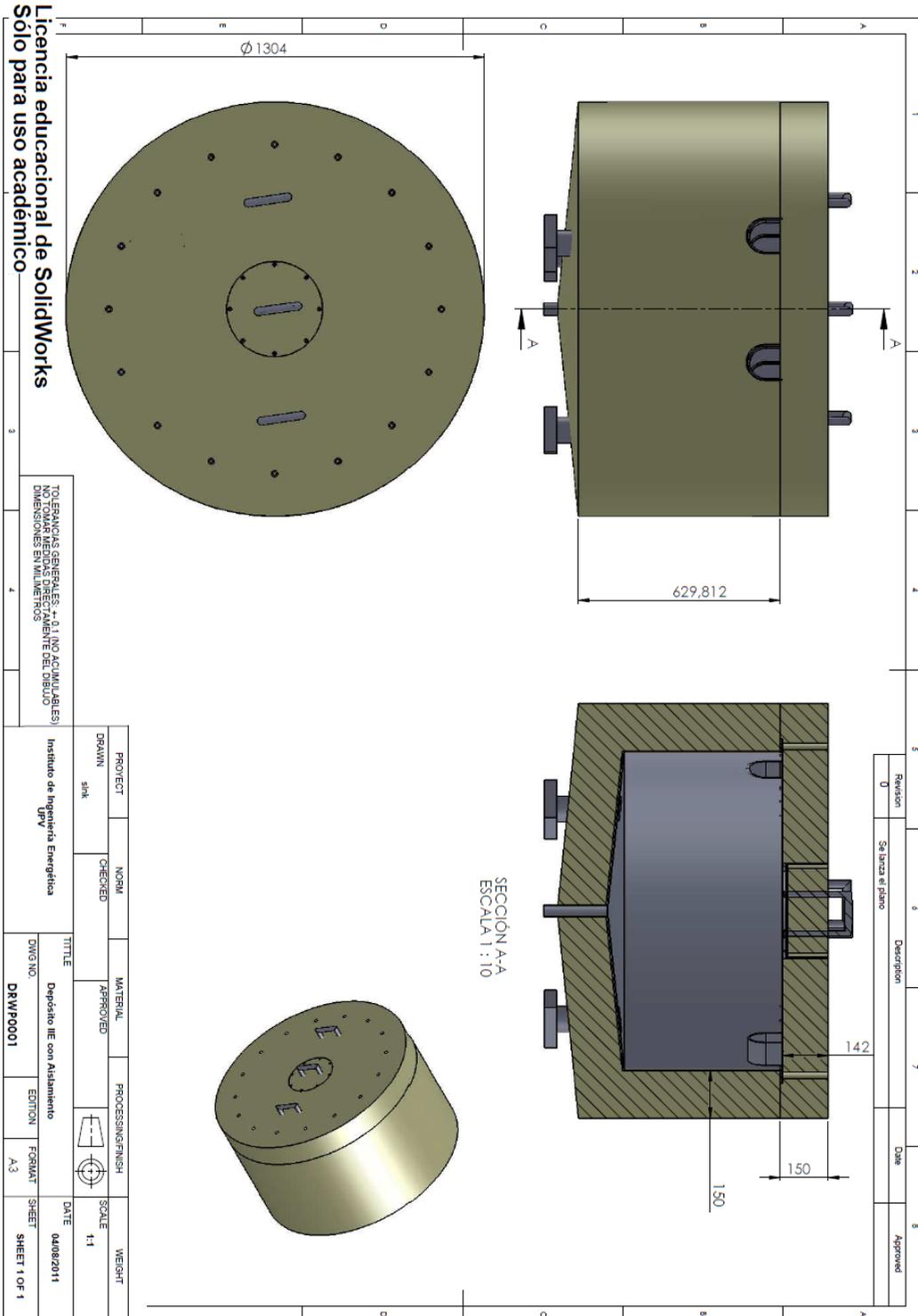


Figura 88. Vasija más aislamiento

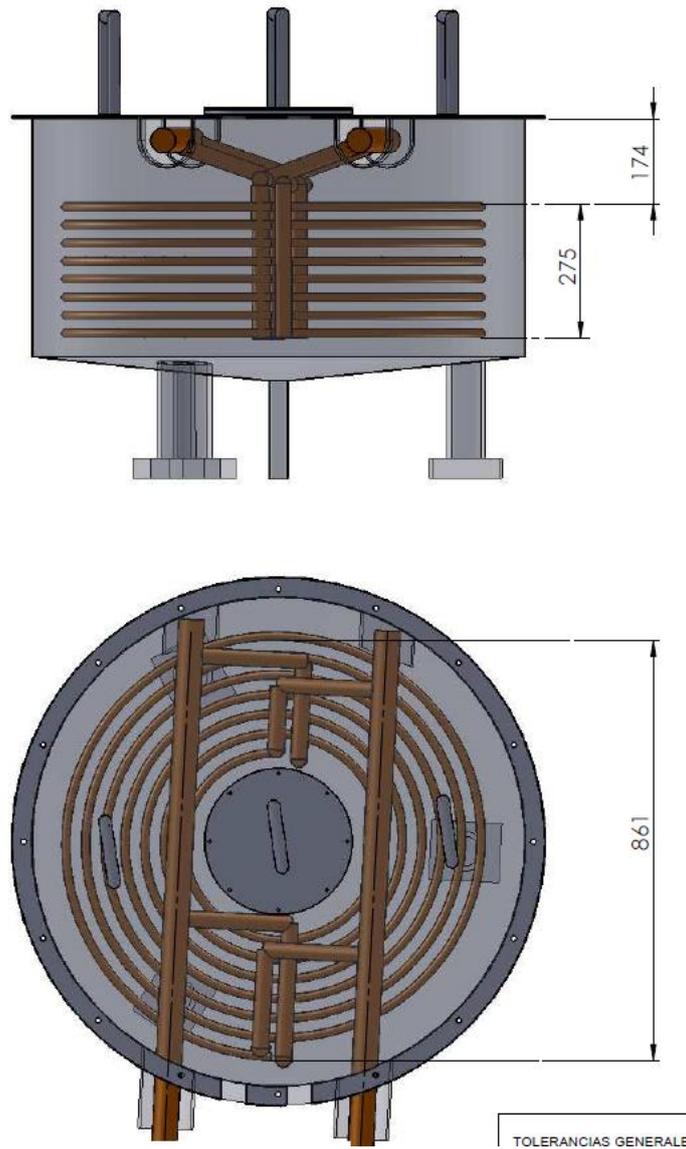


Figura 89. Vasija ensamblada con el intercambiador de calor

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Resume los tubos seleccionados para cada elemento del intercambiador bajo el criterio de conseguir velocidades del fluido caloportador similares a las del depósito CALMAC.

Elemento	Material	D _n
Tubo espirales	Cobre recocido	5/8"
Colectores secundarios	Cobre	42 mm
Colectores primarios	Cobre	54 mm

Tabla 31. Tubos seleccionados para el intercambiador

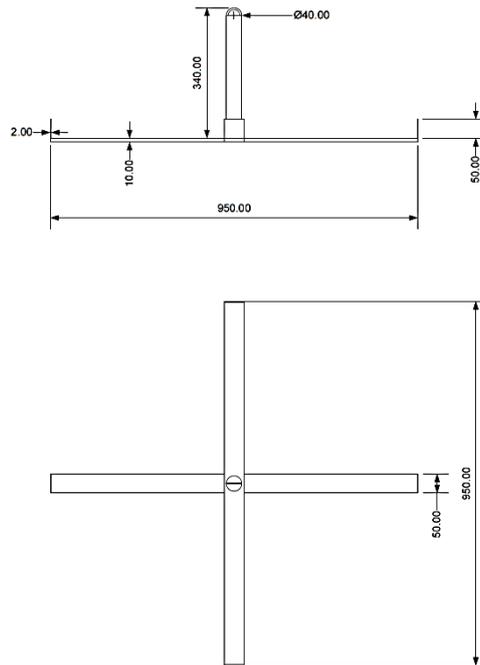


Figura 90. Plano de la estructura del intercambiador

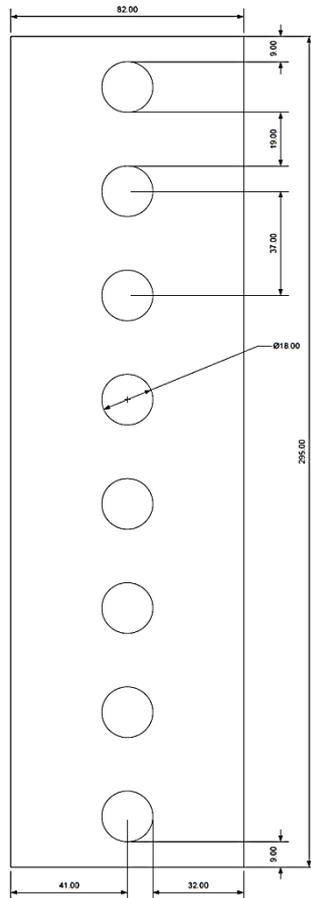


Figura 91. Plano de las pletinas del intercambiador

8.4. Construcción

A lo largo de este apartado se resume todo el proceso constructivo del depósito compacto, desde la fabricación de la vasija en las instalaciones de PROMINOX hasta el manufacturado de cada una de las espirales y su posterior ensamblado con los colectores y demás componentes.

La construcción se supervisó personalmente acudiendo a la empresa y la Figura 92 muestra dos detalles de la vasija durante su fabricación, justo antes de instalar la capa de poliuretano.



Figura 92. Fabricación de la vasija en las instalaciones de PROMINOX

Paralelamente a los trabajos en las instalaciones de PROMINOX, se ha ido avanzando en el laboratorio del IIE en la manufactura del intercambiador de calor. Tal y como muestra la Figura 93, en primer lugar se ha procedido a dibujar la matriz sobre la que se han ido enrollando uno a uno los tubos. La Figura 94 muestra una de las espirales tras haber moldeado el tubo de cobre recocido en la matriz.



Figura 93. Proceso de fabricación de las espirales

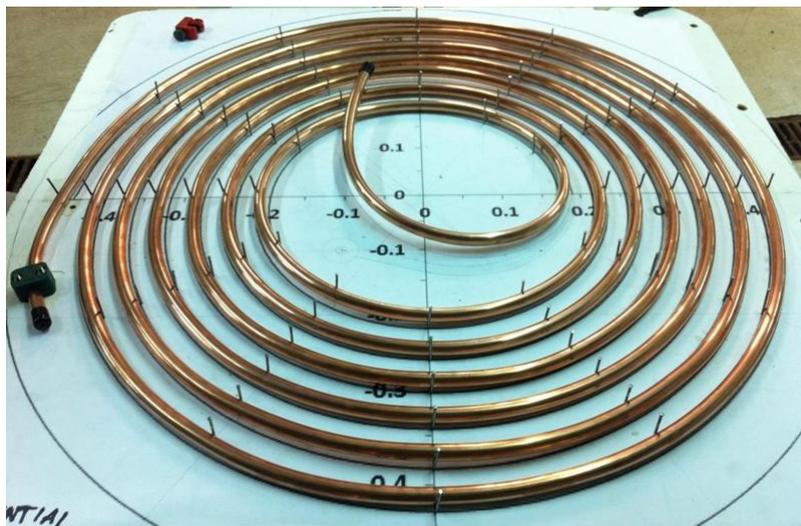


Figura 94. Espiral montada sobre la matriz

Una vez las espirales han sido amoldadas a la espiral patrón de la matriz se ha procedido a cortar los tramos sobrantes, escariar los bordes y recalibrarlos tras la deformación sufrida tras el corte, tal y como muestra la Figura 95, pues las rebabas generadas en el proceso de corte pueden acelerar la corrosión por erosión en la pared interna del tubo. Tras esto, los tubos se han marcado para evitar que entren demasiado en los colectores durante el proceso de unión por soldadura.



Figura 95. Corte, escariado, recalibrado y marcado de los extremos

Una vez marcados los extremos de las ocho espirales, se han ensamblado todas mediante las veinticinco pletinas de acero inoxidable tal y como se puede apreciar en la Figura 96. Tras el montaje y reajuste de la posición de cada una de las espirales, se ha procedido a soldar las pletinas entre sí para limitar al máximo el movimiento de éstas, tal y como muestra la Figura 97.



Figura 96. Resultado tras el ensamblado de los tubos y de las pletinas



Figura 97. Detalle de la soldadura de las pletinas

Tras ajustar la posición de cada espiral, se ha procedido a soldar cada tubo con su respectivo colector secundario, de manera que el flujo entre espirales sea a contracorriente. Los colectores han sido perforados y extrusionados mediante un taladro especial que permite hacer empalmes en derivación con tubos de cobre sin necesidad de accesorios.

La Figura 98 muestra los colectores secundarios una vez taladrados y tras haber sido soldados en el intercambiador de calor, y la Figura 99 muestra el resultado tras ensamblar los colectores secundarios con los primarios ya dentro de la vasija del depósito.



Figura 98. Colectores secundarios tras el taladrado/extrusión y soldados a los tubos



Figura 99. Ensamblado de los colectores primarios y secundarios

Como conclusión de éste capítulo, se ha desarrollado paso a paso el proceso de diseño de un depósito COMPACTO de almacenamiento térmico con PCMs, partiendo de las especificaciones técnicas y estudiando las diferentes posibilidades que ofrecen distintos fabricantes y distribuidores.

Finalmente, se ha optado por una fabricación a medida porque se ajustaba mejor a los requerimientos y se ha procedido al diseño de detalle y a la fabricación del depósito.

9. CONCLUSIONES

A lo largo del presente PFC, fruto de un contrato entre ACCIONA Infraestructuras y el IIE, se ha llevado a cabo el diseño, coordinación de los trabajos y puesta a punto de la instalación de almacenamiento térmico del IIE. También se ha caracterizado un depósito comercial (CALMAC Icebank) y se ha diseñado y fabricado otro más compacto con capacidad de 250 litros de PCM en lugar de 3710 litros, lo que supone una reducción del coste en PCM desde 17000€ hasta cerca de 1500€ con cada parafina utilizada.

El depósito comercial de CALMAC Icebank se ha caracterizado a diferentes temperaturas y caudales con agua como PCM. En el rango de temperaturas (10-15°C) y caudales (1000-4000 kg/h) estudiado, cabe destacar que la temperatura de impulsión tiene un mayor efecto sobre la duración de los ensayos que el caudal. En el caso de las cargas, la temperatura de entrada del fluido caloportador ha de ser menor que la temperatura de nucleación del agua, lo cual es un punto fundamental en el dimensionamiento de enfriadoras para este tipo de instalaciones.

El análisis de los ensayos ha dado lugar a distintas publicaciones. Por una parte, el trabajo ha sido presentado en los congresos de EUROTHERM-Seminario 93 (Noviembre 2011) y aceptado en los congresos INNOSTOCK (Mayo 2012) y EUROTHERM Septiembre 2012, tal y como se muestra en los ANEXOS. También se han escrito dos artículos para revista, de los cuales soy primer autor, y se encuentran actualmente en fase de evaluación. En un primer artículo se han resumido los resultados de las cargas (enviado a "International Journal of Refrigeration") y en otro se han analizado las descargas (revista "Energy"). En los anexos se adjuntan la primera y última página de estos trabajos.

El trabajo realizado, ha permitido adquirir al grupo de investigación PCMs los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para diseñar y poner en marcha una instalación comercial de gran escala. En la actualidad, el depósito CALMAC Icebank se encuentra en las instalaciones de ACCIONA en Sevilla, pendiente de ser incluido en la instalación de almacenamiento térmico de un centro comercial, en cuyo diseño y puesta a punto colaborará el IIE en base a la experiencia adquirida.

Paralelamente al trabajo con el depósito CALMAC, se ha diseñado y construido un depósito COMPACTO capaz de trabajar en un amplio rango de temperaturas, con el objetivo de caracterizar diversos PCMs con distinta temperatura de fusión. Para su diseño, ha sido necesario poner en práctica aspectos multidisciplinares como la resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y compatibilidad de materiales.

A fecha de febrero de 2012, el depósito compacto ya ha sido instrumentado y se están iniciando las primeras cargas y descargas con la parafina RT55 de RUBITHERM.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHRAE: Thermal storage. ASHRAE (editor): *2004 ASHRAE Handbook – HVAC Applications*. Atlanta, 2004.
- [2] ASHRAE: Thermal storage. ASHRAE (editor): *2007 ASHRAE Handbook – HVAC Applications*. Atlanta, 2007.
- [3] Dinçer I, Rosen MA: *Thermal energy storage systems and applications*. Ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [4] Mehling H, Cabeza LF: *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basis and applications*, 1ª edición. Springer, 2008.
- [5] Mehling H, Cabeza LF: Heat and cold storage with PCM. *Heat and Mass Transfer*, pp. 1-10, 2008.
- [6] Paksoy HÖ: *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption Fundamentals, Case Studies and Design*, 2007.
- [7] Andrepont JS: Thermal Energy Storage (TES). *IDEA Annual Conference Indianapolis*, Indiana, 2010.
- [8] Ataer OE: Storage of Thermal Energy. *Encyclopedia of Life Support Systems*, 2006.
- [9] CRISTOPIA www.cristopia.com
- [10] PCM Products Ltd www.pcmproducts.net
- [11] Calmac Manufacturing Corporation: *A technical introduction to thermal energy storage comercial applications*. Englewood, New Jersey, 2002.
- [12] Calmac Manufacturing Corporation: *Ice Bank[®] Performance Manual*. Englewood, New Jersey, 2007.
- [13] Calmac Manufacturing Corporation: *Operation and Maintenance Manual*. Englewood, New Jersey, 2007.
- [14] Calmac Manufacturing Corporation: *Installation manual for icebank installation*. Englewood, New Jersey, 2003.
- [15] Calmac Manufacturing Corporation: *Ice storage systems*. Englewood, New Jersey, 2007.
- [16] International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme: *Task 32: Advanced storage concepts for solar and low energy buildings*. Report C5 on Subtask C: Simulation Models of PCM Storage Units, 2008.

[17] International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme: *Task 32: Advanced storage concepts for solar and low energy buildings*. Report D1 of Subtask D: Review of ideas to improve water tank storage, 2007.

[18] Torregrosa Jaime B: *Modelado y análisis de una instalación con almacenamiento latente de energía térmica de 345 kWh*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010

[19] Centro español de información del cobre: *Manual de tubo y accesorios de cobre*.

[20] DOW: *DOWTHERM SR-1 and DOWFROST HD Heat Transfer Fluids In Thermal Energy Storage*.

[21] Saunders EAD: *Shell-and-tube heat exchangers: Elements of construction*. Hewitt GF (editor): *Heat exchanger design handbook 1998*. Begell house, inc., New York, 1998.

NORMATIVA:

- UNE-EN ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración.
- UNE-EN 14511-1:2008. Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y refrigeración de locales. Parte 1: Términos y definiciones
- UNE-EN 12263:1999. Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Dispositivos interruptores de seguridad para limitar la presión. Requisitos y ensayos.
- UNE-EN 3787:2004. Sistemas de refrigeración y bombas de calor. Requisitos de seguridad y medioambientales.
- UNE-EN 61010-1:2002. Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE 20460-1:2003. Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 1: Campo de aplicación, objeto y principios fundamentales.
- UNE 20460-3:1996. Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 3: Determinación de las características generales.
- UNE 15771:2006. Criterios generales para la elaboración de proyectos de instalaciones eléctricas de baja tensión.
- UNE-EN 60584-1:1997. Termopares. Parte 1: Tablas de referencia.
- UNE-EN 60584-2:1996. Termopares. Parte 2: Tolerancias.
- UNE-EN 60751:1996. Sondas industriales de resistencia termométrica de platino.

ANEXOS

ANEXO 1: PUBLICACIONES

Nota aclaratoria

El contenido de este PFC ha dado lugar a las siguientes publicaciones, de las cuales soy primer autor salvo en uno de los congresos. Para los trabajos que ya han sido publicados, se adjunta el trabajo completo. En el caso de los artículos que todavía no han sido publicados, se ha añadido la primera y última página a modo de justificación.

CONGRESOS

- López-Navarro, J. Biosca-Taronger, J. de Rosa, I. Martínez-Galván, J.C. Esteban-Matías, J. Payá. Analysis of an experimental ice-storage installation. Presentado como poster en el congreso Eurotherm Seminar nº 93 Thermal energy storage and transportation: materials, systems and applications, Burdeos, Francia, 16-18 Noviembre 2011
- A.López-Navarro, I. Martínez-Galván, J.L. Bote-García, J. Payá. Experimental analysis of a 173 kWh ice-storage tank. Aceptado como poster en el congreso Innostock 2012 The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, España, 16-18 Mayo 2012
- Javier Biosca, Jorge Payá, Alejandro López, José M. Corberán. Ice formation modelling around the coils of an ice storage tank. Aceptado como poster en el congreso 6th European Thermal Sciences Conference EURO THERM, Poitiers, Francia, 4-7 Septiembre 2012

ARTÍCULOS EN REVISTA

- López-Navarro, J. Biosca-Taronger, B. Torregrosa-Jaime, I. Martínez-Galván, J.M. Corberán, J.C. Esteban-Matías, J. Payá. Charging performance of an ice-storage installation, Enviado a la revista *International Journal of Refrigeration* (Indice de impacto 2010: 1.439) el 20/01/2012
- López-Navarro, J. Biosca-Taronger, B. Torregrosa-Jaime, J.M. Corberán, J.L. Bote-García, J. Payá, Experimental analysis of the discharge of an ice-storage tank, Enviado a la revista *Energy* el 05/02/2012 (Indice de impacto 2010: 3.565)

ANALYSIS OF AN EXPERIMENTAL ICE-STORAGE INSTALLATION

A. LÓPEZ-NAVARRO^(a), J. BIOSCA-TARONGER^(a), J. DE ROSA^(a), I. MARTÍNEZ-GALVÁN^(a), J. C. ESTEBAN-MATÍAS^(b), J. PAYÁ-HERRERO^{(a), *}

^a Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera s/n, Edificio 8E cubo F 5^a planta Valencia 46022

^b ACCIONA Infraestructuras S.A. Centro Innovación Tecnológica

C/ Valportillo II, 8, Alcobendas 28108 Madrid

Given the actual energy context, Thermal Energy Storage (TES) can play a very important role to widen the integration of renewable energies and compensate the mismatch between the energy generation and supply. TES is actually considered as a key issue in the strategic research agenda of Europe.

Among the different heat storage technologies, latent heat storage (LHS) is attracting an increasing interest as the volumetric storage capacity is much higher than with sensible heat storage and the heat losses can be smaller. Today, more than 150 Phase Change Materials (PCMs) are commercially available, for instance paraffins, hydrated salts or fatty acids. Nevertheless, in practical installations, ice-storage systems are still the most extended solution, particularly in the USA. Despite the disadvantage of the low melting temperature, ice/water combines good properties in terms of reliability, stability, low cost, high latent heat capacity, high specific heat, high density, and safety.

This paper presents the experimental results of an ice-storage installation from the Polytechnic University of Valencia (Spain). The installation has been designed to characterize the behaviour of phase change materials with melting temperatures between -10°C and 100°C. In order to characterize the thermal storage process, an external heat sink and source is required to obtain the charge and discharge curves at constant temperature. The heat carrier fluid is a 30% water-glycol mixture which flows through the ice-storage tank.

The LHS system is a CALMAC ICEBANK tank model 1098C with a nominal capacity of 350 kWh. In this study, the tank has been tested at a partial load of 60 kWh. The tank has 34 counter current spiral-shaped tubes which help to achieve uniform temperatures throughout the phase change material (water). The tubes are immersed

inside the water and the ice builds concentrically around the tubes during the charging of the tank.

In order to charge the storage tank, inlet temperatures of the heat carrier fluid are required within a range of -2°C to -10°C . The necessary cold is produced by means of a 10 kW vapour-compression chiller working with R22. A 3-way valve is used to control the thermal load removed from the primary circuit which contains the heat carrier fluid.

During the discharge of the ice-storage tank, a heat source is required to discharge the system with a constant inlet temperature within a range of $10\text{-}14^{\circ}\text{C}$. This is done using the condensation water from the building (around 22°C) which transfers the thermal load to the heat carrier fluid by means of an intermediate plate heat exchanger.

One key element in the installation is a sensible storage tank which is placed downstream from the LHS system. At the beginning of the charge and discharge process, there is a high temperature gradient between the inlet and outlet of the LHS tank. The sensible storage tank (1000 l) helps to absorb this initial peak load and thus guarantee a constant inlet temperature of the heat carrier fluid.

In this paper, the installation and the measurement procedure are firstly explained. Secondly, the charge and discharge test results are analyzed for different temperature and mass flow rate conditions. The heat losses in the installation are quantified and the melting charge and discharge processes are analyzed in detail.

This work has been developed in the frame of a R&D project funded by the Spanish company ACCIONA Infraestructuras.

Keywords: ice storage, installation, latent heat storage, characterization

*Corresponding author. Tel: +34 963879910; Fax: +34 963877272;

E-mail address: jorpaher@iie.upv.es (J. Payá Herrero)

ANALYSIS OF AN EXPERIMENTAL ICE-STORAGE INSTALLATION

A. LÓPEZ-NAVARRO^(a), J. BIOSCA-TARONGER^(a), J. DE ROSA^(a), I. MARTÍNEZ-GALVÁN^(a),
 J. C. ESTEBAN-MATÍAS^(b), J. PAYÁ^{(a), *}



^{a, *} Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia
 Camino de Vera s/n, Edificio 8E cubo F 5ª planta Valencia 46022, E-mail: jorpaher@ije.upv.es
^b ACCIONA Infraestructuras S.A. Centro Innovación Tecnológica
 C/ Valportillo II, 8, Alcobendas 28108 Madrid



INTRODUCTION

Latent heat thermal storage (LHTS) is attracting an increasing interest due to the high volumetric storage capacity and to the low heat transfer losses among other reasons [1, 2]. Water is the most commonly used phase-change material (PCM). Water combines good properties in terms of reliability, stability, low cost, high latent heat capacity and safety [2].

This paper presents experimental results of an internal melt ice-on-coil system from the Polytechnic University of Valencia (Spain). The installation has been designed to characterize the behaviour of different thermal energy storage systems within the temperature range -5°C to 100°C.

EXPERIMENTAL SET-UP

The LHTS system (Fig. 1) is a CALMAC ICEBANK[®] tank 1098C with a nominal capacity of 350 kWh. In this study, the tank has been tested at a partial load of 50 kWh. Heat transfer is ensured by counter current spiral-shaped tubes which are immersed in the PCM (water). The experimental set-up is shown in Fig. 2 and has the following main components:

- LHTS containing 6 thermocouples in the PCM
- Thermal resistances in the inlet/outlet of the LHTS
- Hot and cold source heat exchangers
- Circulation pump GRUNDFOS CRE 5-5
- Coriolis flow meter from SIEMENS
- 10 kW water-cooled chiller working with R-22
- 2 PID controllers to regulate the inlet temperature

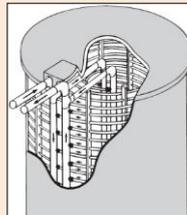


Fig. 1. CALMAC ICEBANK[®] tank [3]

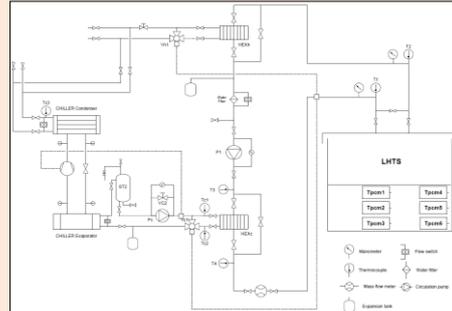


Fig. 2. Layout of the experimental set-up

RESULTS

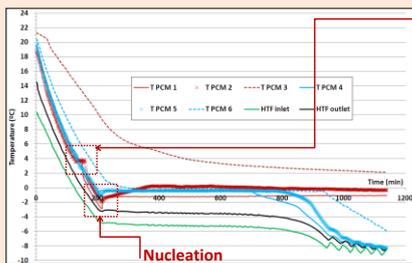


Fig. 3. Typical charge curves (Test: $T_{in} = -5.4^{\circ}\text{C}$; $m = 3275 \text{ kg/h}$)

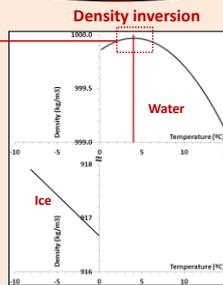


Fig. 4. Water density

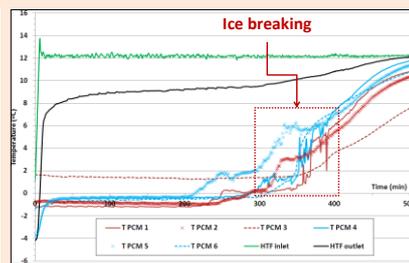


Fig. 5. Typical discharge curves (Test: $T_{in} = 12.2^{\circ}\text{C}$; $m = 3000 \text{ kg/h}$)

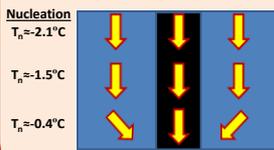


Fig. 6. Scheme of the nucleation process

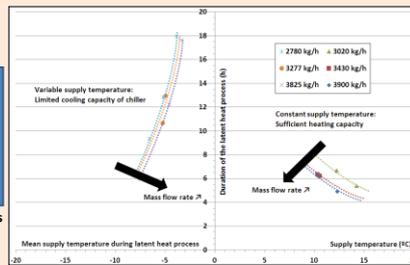


Fig. 7. Duration of the latent heat transfer period

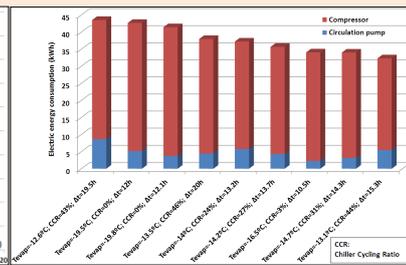


Fig. 8. Electric energy consumption

CONCLUSIONS

- o Nucleation starts from the top towards the bottom of the tank (coldest PCM at the top)
- o The first and last nucleation points have temperatures of -2.1°C and -0.4°C respectively
- o In the discharge tests, ice breaking and lifting regulates the heat transfer
- o Lower energy consumptions are achieved for high evaporation temperatures and mass flow rates

REFERENCES

- [1] H. Mehling, L.F. Cabeza. Heat and cold storage with PCM, An up to date introduction into basics and applications, Heat and Mass Transfer 2008
- [2] ASHRAE. ASHRAE Handbook—HVAC Applications 2007
- [3] <http://www.calmac.com/>

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A 173 KWH ICE-STORAGE TANK

Alejandro López-Navarro¹, Israel Martínez-Galván¹, Juan Luis Bote-García², Jorge Payá¹

¹Instituto de Ingeniería Energética, Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n, Edificio 8E cubo F 5ª planta Valencia 46022, Spain
Phone: 34-963879910, Fax: 34-963877272, e-mail: jorpaher@iie.upv.es

² ACCIONA Infraestructuras S.A. Centro Innovación Tecnológica
C/ Valportillo II, 8, Alcobendas Madrid 28108, Spain

Phone: 34-917912020, Fax : 34-917912101, e-mail: jbotegarcia@acciona.es

Introduction

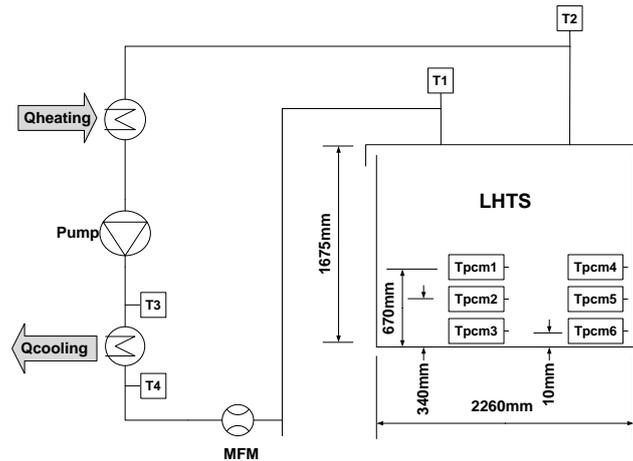
Latent heat storage (LHS) systems are attractive due to the high volumetric storage capacity and low heat transfer losses [1-2]. Many Phase Change Materials (PCMs) are being tested, each of them with different potential applications. In air-conditioning for instance, phase change temperatures between 0°C and 10°C are required. Ice storage is a low cost and simple solution but presents the drawback in the chiller performance at low evaporation temperatures. Furthermore, there is still a great effort to do in order to gain more experience in the design and operation of such systems.

This paper presents an experimental characterization of a 173 kWh ice-storage tank. The charge and discharge tests are analyzed, as well as the electrical consumption of each component.

Materials and method

The layout of the experimental installation is shown in Figure 1. The LHS system is a CALMAC ICEBANK tank model 1098C with a nominal capacity of 345 kWh. In this study, the tank has been tested at a partial load of 173 kWh. The ice-storage system is based on an immersed heat exchanger surrounded by the phase change material (water). The rest of the installation has been designed in order to ensure a constant inlet temperature of the heat transfer fluid (HTF). Mass flow rates between 1000 kg/h and 4000 kg/h of the HTF are achieved via a variable-speed pump.

Figure 1. Layout of the experimental installation



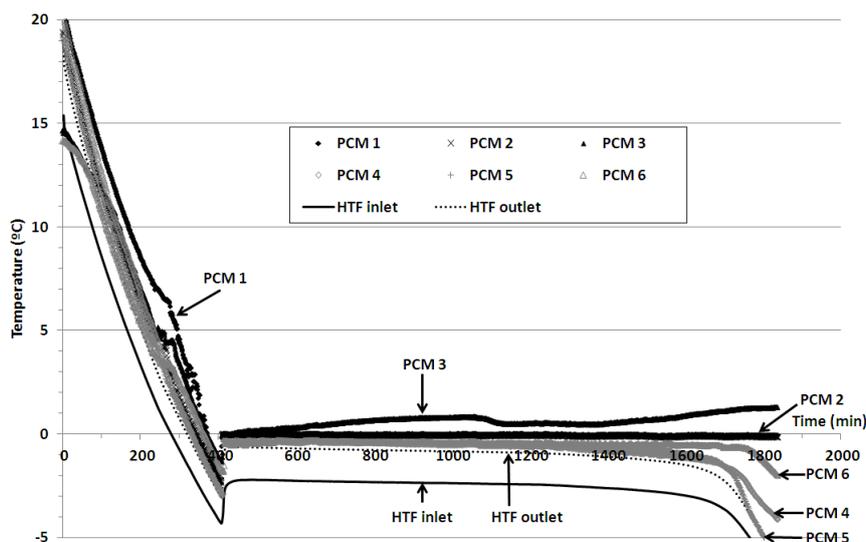
The required cooling power (charge tests) is enabled by means of a 10 kW air to water chiller working with R22. The building condensation ring (water at 24.5°C) provides the necessary heating power for the ice-melting (discharge tests).

This paper analyzes the charge and discharge tests which have been carried out with different supply temperatures and mass flow rates of the heat HTF (26% water/glycol mixture). In the charge tests, the inlet water temperature varies between -2°C and -5°C. The inlet temperatures during the ice melting vary between 10°C and 15°C.

Results and discussion

Figure 2 shows the results of an ice-formation test carried out with a mass flow rate of 3851 kg/h and a constant inlet temperature of -2.5°C. In the full paper, the results of the tests are analyzed in detail.

Figure 2. Charge tests at 3851 kg/h and an inlet temperature of -2.5°C



Conclusions

This paper analyzes the measurements of ice formation and melting. During the charge tests, the HTF has to be supplied at temperatures below the nucleation temperature which has been found to take place between -1°C and -3°C . The lowest energy consumption has been reached for the highest evaporation temperature in the chiller despite the fact that the energy consumption of the circulation pump is higher in a longer charge period.

References

- [1] H. Mehling, L.F. Cabeza. Heat and cold storage with PCM, An up to date introduction into basics and applications, Heat and Mass Transfer 2008
- [2] ASHRAE. ASHRAE Handbook – HVAC Applications 2007

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge ACCIONA Infraestructuras S.A. for the financial support.

ICE FORMATION MODELLING AROUND THE COILS OF AN ICE STORAGE TANK

Javier Biosca, Jorge Payá, Alejandro López, José M. Corberán

Institute for Energy Engineering

Universidad Politécnica de Valencia

C/ Camino de Vera s/n. 46022 Valencia (Spain)

E-mail: corberan@ter.upv.es

Keywords: ice formation, natural convection around tubes, flow inversion, ice storage tank

Abstract

A special test rig for the study of the ice formation process around the tubes of a commercial ice storage tank has been built at the Institute for Energy Engineering of the UPV. This paper first presents the characteristics of the rig and of the ice tank. The employed tank is composed of a series of long coils is parallel. The tube coils are immersed in the tank with water, and ice is formed/melted around the external part of the tubes. The fluid going along the tubes is a low temperature heat transfer fluid.

The model consists of the solution of the transport equation for the fluid inside the tube, the heat transfer across the tube wall and the external ice layer, and the equations for the growth of the layer. The paper first discussed the possible numerical schemes that can be applied to the solution of the transport equation for the heat transfer fluid along the tubes. 1st order and 2nd order explicit schemes are compared, first with the analytical solution for the adiabatic case, and then with the refined meshed for the non adiabatic case. Advantages and disadvantages of the studied schemes for the considered case are discussed.

Then the model for the ice layer formation and the heat transfer across the tube and the ice layer is presented, with explanation of how to model the creation of the first ice layer. The estimation of the heat transfer coefficient around the tube is based on

the modification of the Grahof number proposed by Gebahrt which seems to capture well the special variation of the water density close to 0°C.

The model is first checked against experimental results published in literature. The agreement between the calculated results and the experimental ones is general very good with some differences which are fully commented.

Finally, the results of the model are compared with a sample of experimental results obtained during the charging period of the ice storage tank built at the laboratory at different operation conditions, namely, inlet temperature of the heat transfer fluid which circulates inside the tubes and flow rate. The model for the moment does not have an adequate estimation of the subcooling required to initiate the ice formation, so the initial temperature is adjusted for each experiment in order to be able to compare the results of the model along the period where effectively the ice layer appears and start to grow. The results show that the evolution of the outlet temperature is very well predicted.

Charging performance of an ice-storage installation

A. López-Navarro^a, J. Biosca-Taronger^a, B. Torregrosa-Jaime^a,
I. Martínez-Galván^a, J.M. Corberán^a, J.C. Esteban-Matías^b, J. Payá^{a,*}

^a Instituto de Ingeniería Energética IIE (Universidad Politécnica de Valencia)

Camino de Vera s/n, Edificio 8E cubo F 5ª planta, 46022 Valencia, Spain

^b ACCIONA Infraestructuras S.A. Centro Innovación Tecnológica

C/ Valportillo II, 8, 28108 Alcobendas Madrid, Spain

Abstract

This paper presents the results of an experimental ice-storage installation. The storage tank (total capacity 172 kWh) is an internal melt-ice-on-coil system. A detailed thermal and energy performance analysis has been carried out to study the ice formation process. The experimental campaign consists of a series of tests at different inlet temperatures and mass flow rates of the heat transfer fluid. This study analyzes (i) the chiller performance, (ii) the ice-formation process and (iii) the energy consumption of the installation. Supply temperatures between -2.5°C and -5.2°C have been sufficient to charge the tank without using any nucleating agents. The lowest energy consumption has been achieved for the fastest charging tests.

Keywords: Thermal storage, experimental installation, ice formation, energy consumption

*Corresponding author. Tel: +34 963879910; Fax: +34 963877272;

E-mail address: jorpaher@iie.upv.es (J. Payá)

CONCLUSIONS

In this work, the charging of an ice-storage tank has been analyzed. Different tests have been performed to investigate the effect of the mass flow rate and supply temperature of the HTF. The following conclusions have been obtained:

During the charging tests, the HTF has to be supplied at temperatures below the nucleation temperature. A maximum subcooling degree of 3K has been observed.

The lowest energy consumption has been reached for low mass flow rates and cold supply temperatures. The chiller consumption is much higher than the circulation pump. Thus, fast charging is desirable as it decreases the total energy consumption. Low mass flow rates help decrease the supply temperature, but below a certain value (in this case 1915 kg/h) the low forced convection of the HTF can lead to longer charging tests.

Natural convection is the predominant heat transfer mechanism inside the tank. The effect of the density inversion at 4°C can be observed not only in the temperatures of the water, but also on the HTF. Before the nucleation, the warmest and denser water is collected in the bottom of the tank. Thus, the HTF becomes warmer as it flows through the spiral-shaped coils in the bottom.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge ACCIONA Infraestructuras for the financing support and collaboration.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE DISCHARGE OF AN ICE-STORAGE TANK

López-Navarro^a, J. Biosca-Taronger^a, B. Torregrosa-Jaime^a,

J.M. Corberán^a, J.L. Bote-García^b, J. Payá^{a,*}

^a Instituto de Ingeniería Energética IIE (Universidad Politécnica de Valencia)

Camino de Vera s/n, Edificio 8E cubo F 5ª planta, 46022 Valencia, Spain

^b ACCIONA Infraestructuras S.A. Centro Innovación Tecnológica

C/ Valportillo II, 8, 28108 Alcobendas Madrid, Spain

ABSTRACT

In this paper, the discharge of an experimental ice-storage tank is analyzed. The storage tank is an internal melt-ice-on-coil system. The discharge process has been characterized by means of tests under different supply temperatures and mass flow rates of the heat transfer fluid. The results indicate that once the ice breaks and floats towards the top of the tank, the heat transfer fluid in the top coils becomes colder than in the bottom coils. The mass flow rate and supply temperature have a significant effect on the discharge duration and their impact has been predicted by means of a two-parameter correlation.

Keywords: *Thermal storage, experimental installation, ice melting, ice breaking*

*Corresponding author. Tel: +34 963879910; Fax: +34 963877272;

E-mail address: jorpaher@iie.upv.es (J. Payá)

CONCLUSIONS

In this work, the discharge of an ice-storage tank has been analyzed. Different tests have been performed to investigate the effect of the mass flow rate and supply temperature of the HTF. The following conclusions have been obtained:

The higher the mass flow rate and the supply temperature, the faster the discharge rate. Hence, the Reynolds and Stefan number act as the driving force of the discharge tests. A simple two-parameter correlation predicts accurately the duration of the discharge tests as a function of the operating conditions and can thus be useful for engineering purposes. In the tested operating conditions ($m=3000-4000$ kg/h, $T_{\text{supply}}=10-15^{\circ}\text{C}$), the supply temperature has a bigger effect on the discharge duration than the mass flow rate.

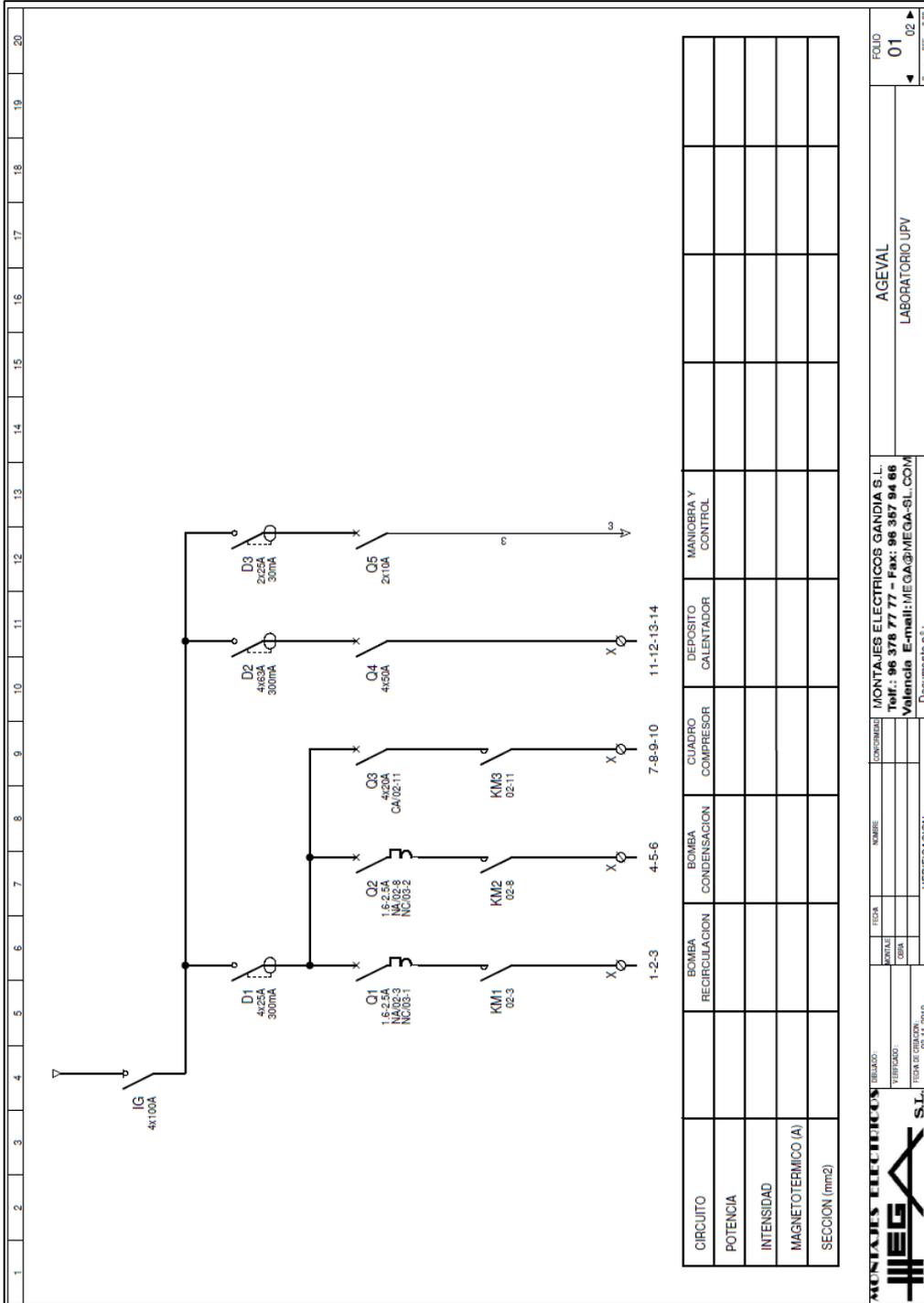
Ice breaking is rather random but nevertheless, follows a certain pattern. When the ice starts to break, it floats and the heat transfer fluid which returns from the upper coils, where most of the ice is collected, tends to decrease. On the contrary, the temperature of the heat transfer fluid in the lower coils tends to increase more rapidly.

Convection is the predominant heat transfer mechanism in the phase-change material due to the significant density difference between water and ice. Ice floating is observed not only on the temperatures of the water/ice, but also on the return temperatures of the heat transfer fluid.

ACKNOWLEDGEMENTS

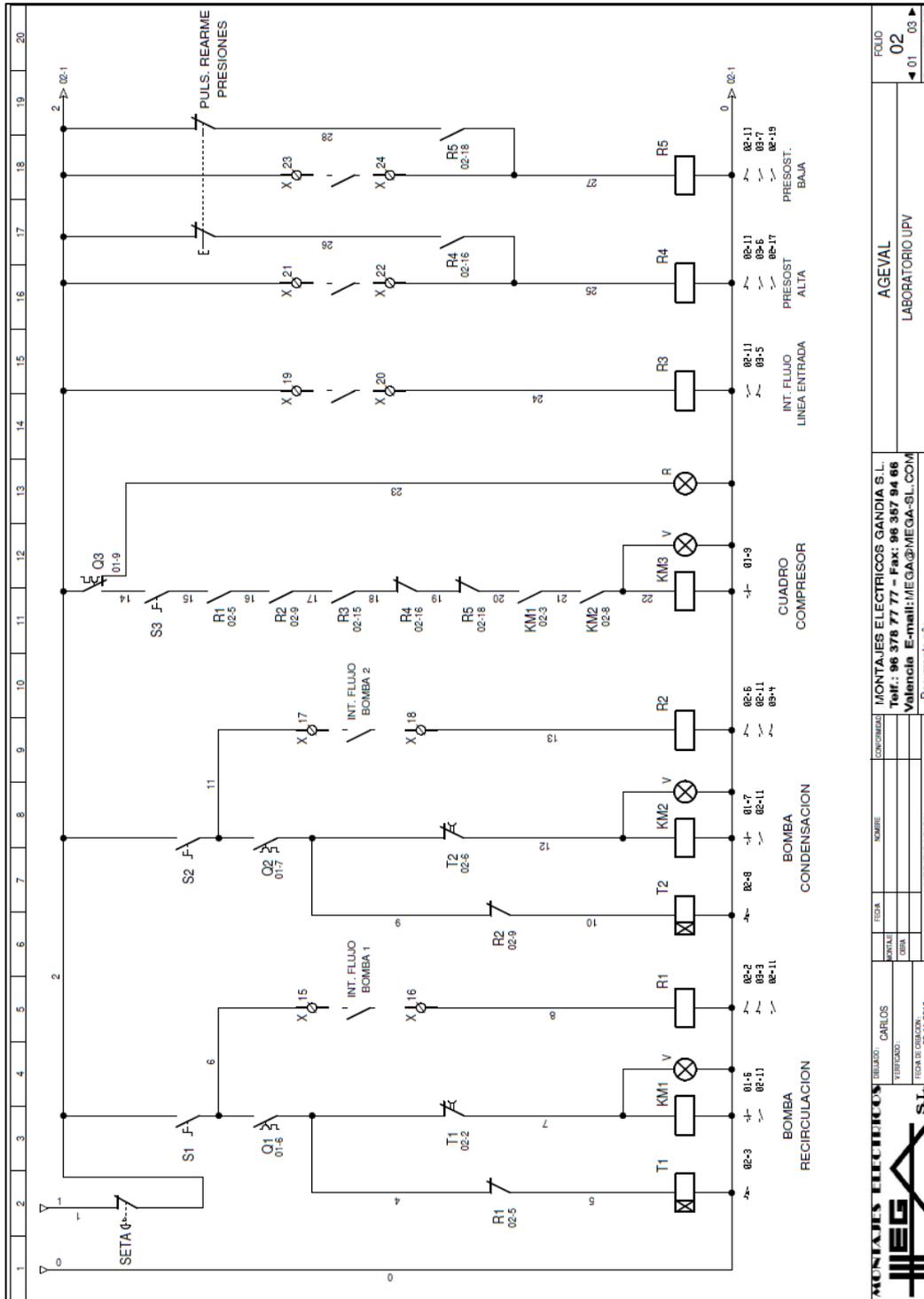
The authors gratefully acknowledge ACCIONA Infraestructuras for the financing support and collaboration.

ANEXO 2: ESQUEMA DEL CUADRO ELÉCTRICO PRINCIPAL

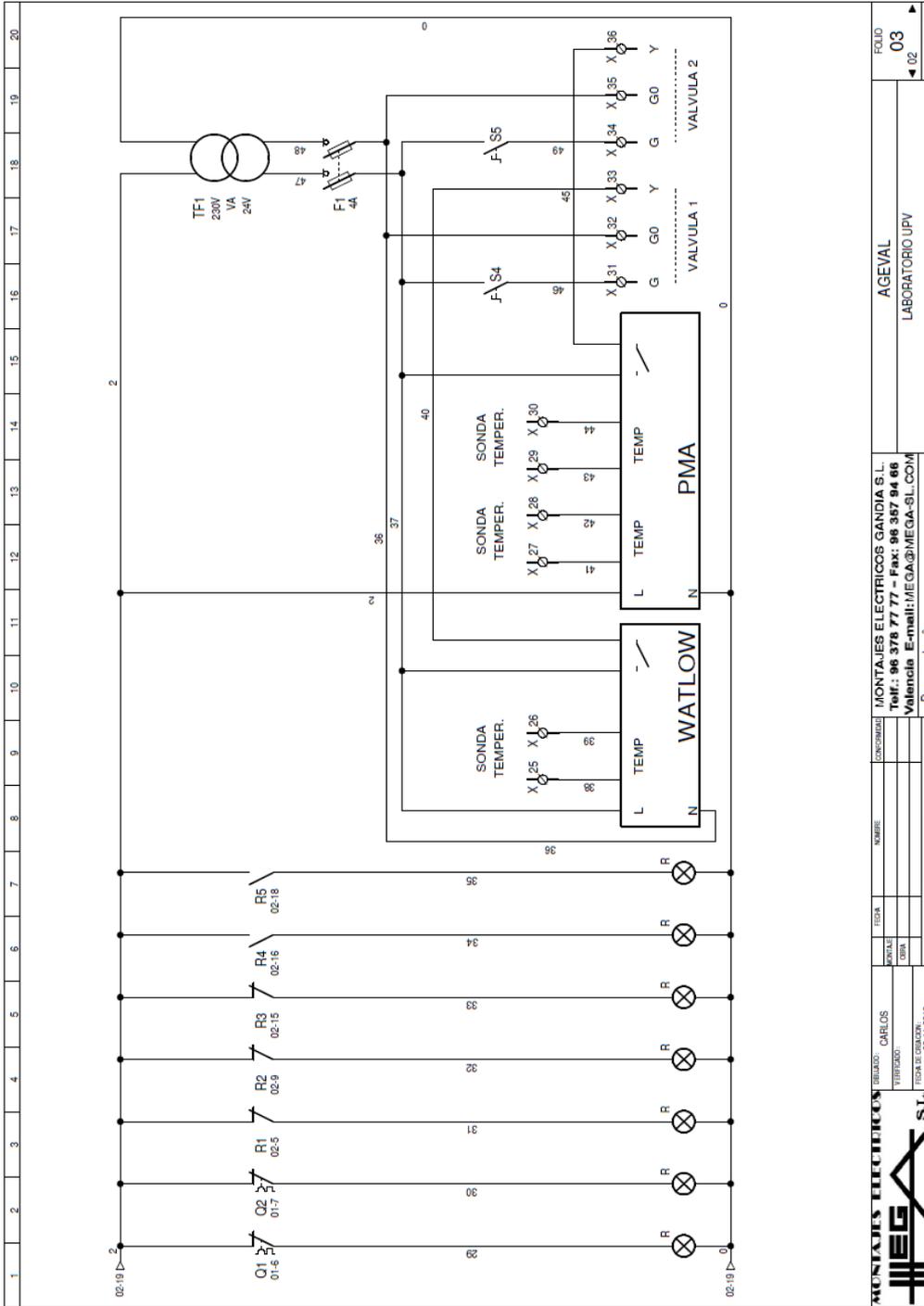


CIRCUITO	BOMBA RECIRCULACION	BOMBA CONDENSACION	CUADRO COMPRESOR	DEPOSITO CALENTADOR	MANOBRAY CONTROL
POTENCIA					
INTENSIDAD					
MAGNETOTERMICO (A)					
SECCION (mm2)					

MONTAJES ELECTRICOS
MEGA S.L.
 DISEÑADO: [] VERIFICADO: []
 FECHA: [] FECHA: []
 DIBUJANTE: []
 VERIFICACION: []
 DOCUMENTO n.º: []
 MONTAJES ELECTRICOS GANDIA S.L.
 Teff: 98 378 77 77 - Fax: 98 367 94 66
 Valencia E-mail: MEGA@MEGA-SL.COM
 AGEVAL
 LABORATORIO UPV
 FOLIO 01
 02
 Programa EE y ZD



MONTAJES ELECTRICOS		REVISADO: CARLOS	FECHA:	NOMBRE:	CONFORMADO:	FOLIO 02	
MEGA S.L.		VERIFICADO:	DIAGRAMA:	VERIFICACION:		01 03	
		FECHA DE EMISION:				Programa S.I.E. v. 2.20	
						AGIVAL	
						LABORATORIO UPV	
						Documento n.º:	
						I/MONTAJES ELECTRICOS GANDIA S.L.	
						Telf.: 96 378 77 77 - Fax: 96 357 94 66	
						Valencia E-mail: MEGA@MEGA-SL.COM	



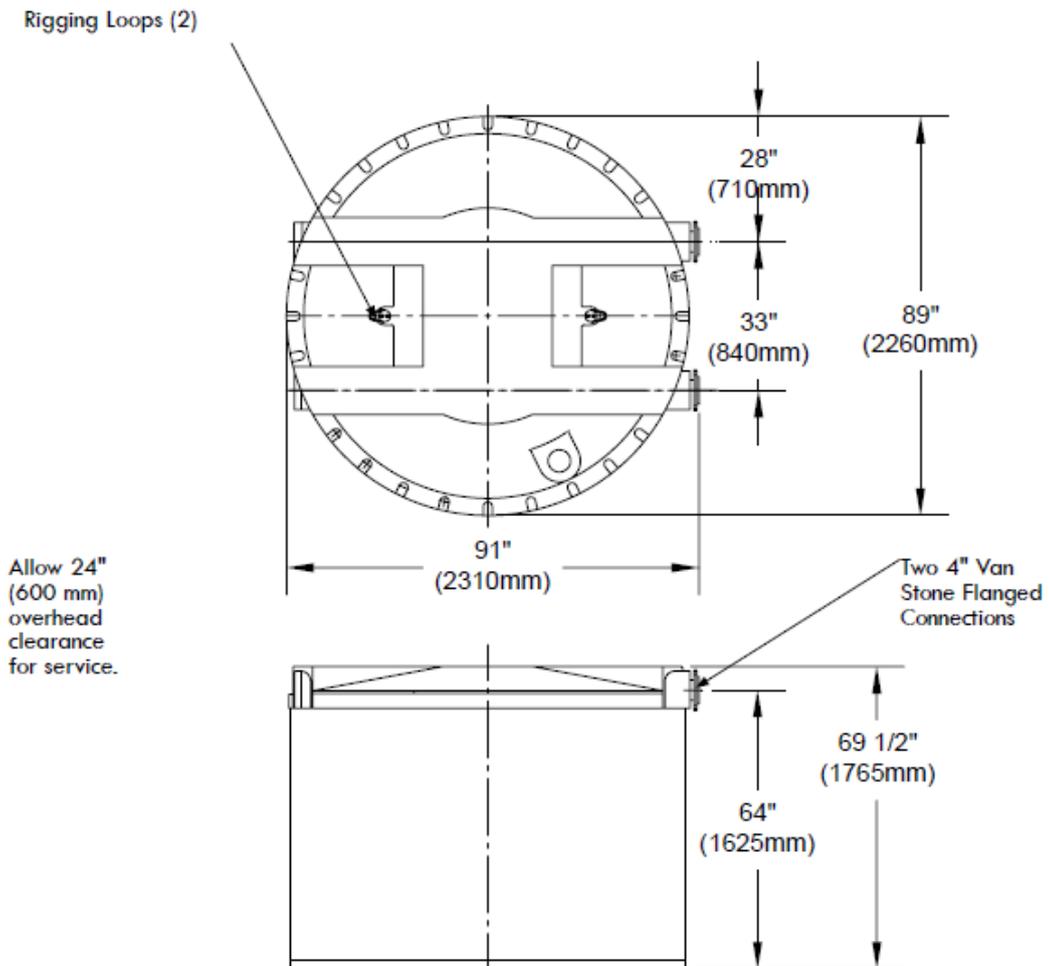
MONTAJES ELECTRICOS 		DIBUJADO: CARLOS VERIFICADO: FECHA DE EMISION: 05-11-2010	NOMBRE: FECHA: DIBUJADO: OBRA:	VERIFICACION:
MONTAJES ELECTRICOS GANDIA S.L. Telf.: 96 378 77 77 - Fax: 96 387 94 86 Valencia E-mail: MEGA@MEGA-SL.COM		DOCUMENTO:		
ACEVAL LABORATORIO UPV		FOLIO: 03 02		

ANEXO 3: ESQUEMA DEL DEPÓSITO CALMAC



DRAWING
Model 1098C2F
August 2007
CS-63

CALMAC Manufacturing Corporation 3-00 Banta Place Fair Lawn, NJ 07410 Tel (201) 797-1511 www.Calmac.com



NOTE: Tolerance for all dimensions is $\pm 1/2"$ (12.5 mm)

DOCUMENTO
Nº2:
PLIEGO DE
CONDICIONES

1.	MANUAL DEL USUARIO DE LA INSTALACIÓN DE PCMS	1
1.1.	Ensayo de carga sin el depósito ST1	3
1.2.	Ensayo de carga con el depósito ST1	5
1.3.	Ensayo de descarga sin el depósito ST1.....	6
1.4.	Ensayo de descarga con ST1	7
3.	CONDICIONES TÉCNICAS	9
3.1.	Introducción.....	9
3.2.	Requisitos de seguridad y medio ambiente	9
3.2.1.	Introducción	9
3.2.2.	Objeto y campo de aplicación	11
3.2.3.	Definiciones	11
3.2.4.	Instalación, puesta en marcha.....	15
3.2.5.	Pruebas y marcado	15
3.2.6.	Funcionamiento y mantenimiento	16
3.3.	Diseño y construcción de los sistemas de refrigeración.....	17
3.3.1.	Requisitos generales.....	17
3.3.2.	Requisitos relativos a la presión.....	17
3.3.3.	Unión de tuberías	18
3.3.4.	Válvulas y dispositivos de protección.....	20
3.4.	Ensayos y puesta en marcha.....	22
3.4.1.	Ensayos	22
3.4.2.	Resultados de los ensayos	22

1. MANUAL DEL USUARIO DE LA INSTALACIÓN DE PCMS

Protocolo para cargas y descargas con agua como PCM

El presente documento es un manual para la realización de ensayos de carga y descarga simples con el depósito de comercial de CALMAC Icebank.

Es importante remarcar que ante cualquier tipo de fallo se ha de parar por completo la instalación pulsando la seta de emergencia (Figura 1).



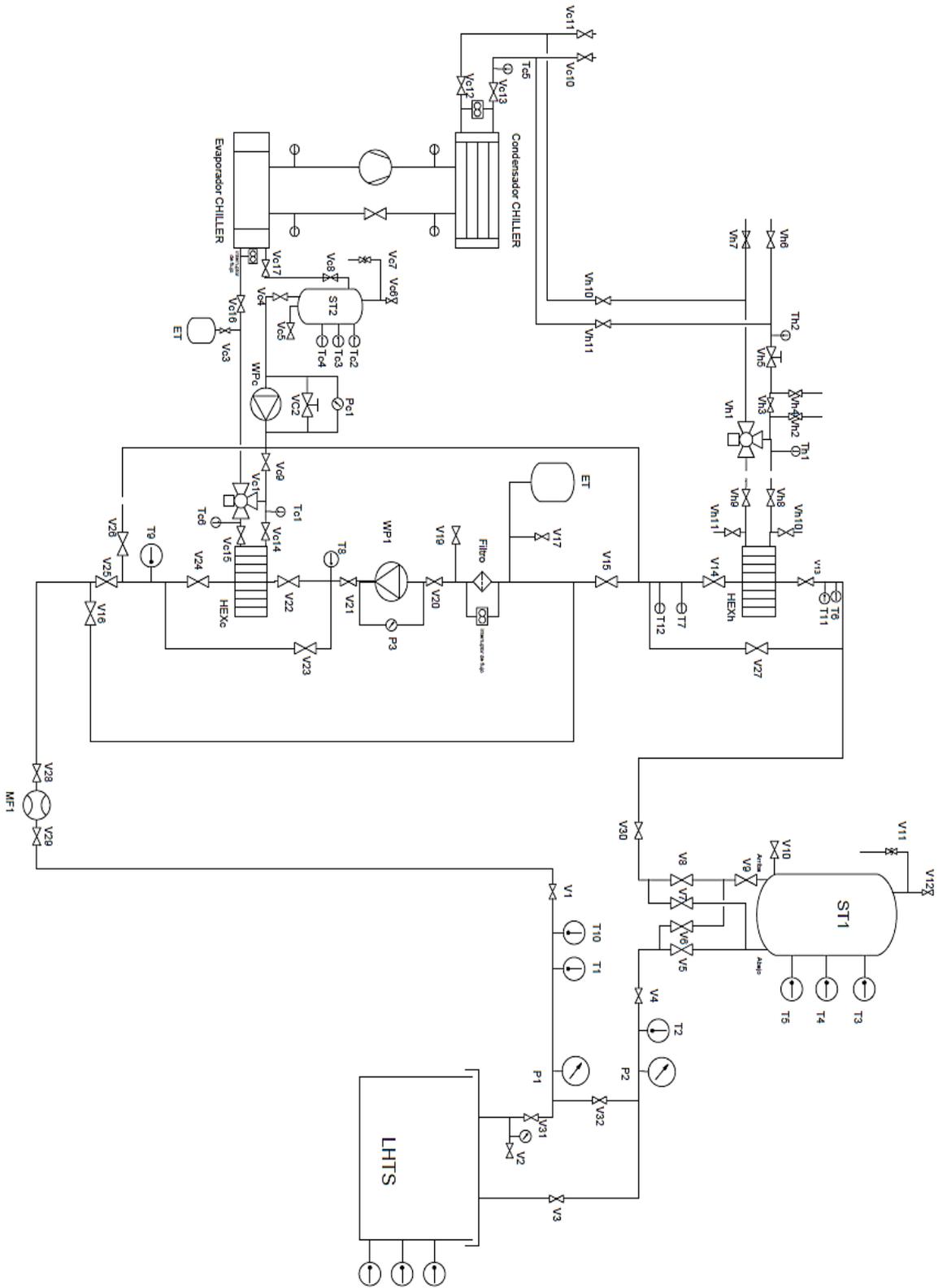
Figura 1. Seta de parada de emergencia

En el presente manual se hace referencia a las válvulas del esquema hidráulico de la instalación (Figura 2). Como nomenclatura, se utilizan los términos “A” y “C” para las válvulas en posición abierta y cerrada respectivamente. Al tratarse de una guía para la realización de ensayos de carga y descarga simples, hay una serie de válvulas que no cambian nunca de estado. Estas válvulas, sin una función específica en los ensayos simples, son:

Válvula	V15	V20	V21	V25	V26	V16
Estado	A	A	A	A	C	C

Válvula	V _H 6	V _H 7	V _H 10	V _H 11	V15
Estado	C	C	A	A	A

Las válvulas de corte se han de operar siempre con suavidad, pues pueden provocar golpes de ariete peligrosos para la integridad de la instalación.



1.1. Ensayo de carga sin el depósito ST1

Secuencia de pasos a seguir para lanzar una carga. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de descarga previamente, se han de seguir los pasos siguientes:

1. Comenzar a adquirir los datos en el PC a través del datalogger
2. Ejecutar el software Plant Visor para hacer un seguimiento de los parámetros del ciclo termodinámicos del chiller
3. Comprobar que el depósito ST1 no está conectado al circuito principal:

Válvula	V5	V6	V9	V7	V8	V7
Estado	C	A	C	C	A	C

4. Abrir el bypass del intercambiador de placas del foco frío

Válvula	V22	V23	V24
Estado	A	C	A

5. Verificación de presiones de los circuitos

Manómetro	P1	P3	Pc1
Estado	P1 < 6 bar	P3 > 2 bar	P3 > 2 bar

6. Arrancar las bombas del circuito primario y secundario
7. Variar la frecuencia de giro de la bomba del circuito primario hasta alcanzar el caudal nominal del ensayo a realizar
8. Abrir las llaves de las tomas de agua de condensación del chiller

Válvula	Vc12	Vc12
Estado	A	A

9. Activar el actuador del foco frío y fijar la temperatura de consigna en el Display del PID WATLOW (Figura 3)



Figura 3. PID WATLOW e interruptor del actuador del foco frío

- Esperar hasta que se desactivan las 3 alarmas de los flujostatos del cuadro eléctrico principal (Figura 4)



Figura 4. Cuadro eléctrico principal con las 3 alarmas activadas

- Arrancar el chiller y fijar un “setpoint” 5°C menos en el Display del microchiller que la temperatura nominal del ensayo a realizar (Figura 5). El recalentamiento del vapor a la entrada del compresor nunca debe ser menor de 8 K.



Figura 5. Display del microchiller

Secuencia de pasos a seguir para parar una carga:

- Parar el chiller
- Desactivar el actuador del foco frío
- Cerrar las llaves de las tomas de agua de condensación del chiller:

Válvula	Vc12	Vc12
Estado	C	C

4. Parar las bombas del circuito primario y secundario
5. Cerrar el bypass del intercambiador de placas del foco frío

Válvula	V22	V23	V24
Estado	C	A	C

6. Guardar los datos del ensayo siguiendo la nomenclatura específica de la campaña de ensayos

1.2. Ensayo de carga con el depósito ST1

La secuencia de pasos a seguir para lanzar una carga con el depósito de inercia ST1 es la misma que la anterior, tan solo incluyendo los siguientes pasos a partir del punto 5. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de descarga previamente:

1. Bypasear el depósito LHTS:

Válvula	V31	V3	V32
Estado	C	C	A

2. Conectar ST1 al circuito principal en modo carga:

Válvula	V5	V6	V7	V9	V8	V9
Estado	A	C	C	A	A	A

3. Una vez el ST1 se encuentra homogéneamente a la temperatura nominal del ensayo, conectar el depósito LHTS al circuito:

Válvula	V31	V3	V32
Estado	A	A	C

4. Bypasear el depósito ST1 cuando la temperatura de salida de ST1 sea mayor que la temperatura de entrada LHTS.

Válvula	V5	V6	V9	V7	V8	V7
Estado	C	A	C	C	A	C

1.3. Ensayo de descarga sin el depósito ST1

La secuencia a seguir para lanzar un ensayo de descarga siempre es la misma. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de carga previamente:

1. Comenzar a adquirir los datos en el PC a través del datalogger
2. Conectar el intercambiador del foco caliente al circuito de agua de condensación

Válvula	VH10	VH11	VH3	VH8	VH9
Estado	C	C	A	A	A

3. Activar el actuador del foco caliente y fijar la temperatura de consigna en el Display del PID PMA (Figura 6)



Figura 6. PID PMA e interruptor del actuador del foco caliente

4. Abrir el bypass del intercambiador de placas del foco caliente

Válvula	V13	V14	V27
Estado	A	A	C

5. Arrancar la bomba del circuito primario

Secuencia de pasos a seguir para parar una carga:

1. Parar la bomba del circuito primario
2. Cerrar el bypass del intercambiador de placas del foco caliente

Válvula	V13	V14	V27
Estado	C	C	A

3. Desactivar el actuador del foco caliente
4. Aislar el intercambiador de placas 2 del circuito de agua de condensación y vaciar el agua de su interior

Válvula	VH9	VH8	VH3	VH10	VH11
Estado	C	C	C	A	A

5. Guardar los datos del ensayo siguiendo la nomenclatura específica de la campaña de ensayos

1.4. Ensayo de descarga con ST1

La secuencia de pasos a seguir para lanzar una descarga con el depósito de inercia ST1 es la misma que la anterior, tan solo incluyendo los siguientes pasos a partir del punto 4. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de descarga previamente:

4. Suponiendo que se ha terminado un ensayo de descarga previamente:

1. Bypasear el depósito LTSH:

Válvula	V31	V3	V32
Estado	C	C	A

2. Conectar ST1 al circuito principal en modo descarga:

Válvula	V5	V6	V7	V9	V8	V9
Estado	C	A	A	A	C	A

3. Una vez el ST1 se encuentra homogéneamente a la temperatura nominal del ensayo, conectar el depósito LTSH al circuito:

Válvula	V31	V3	V32
Estado	A	A	C

4. Bypasear el depósito ST1 cuando la temperatura de salida de ST1 sea menor que la temperatura de entrada de LHTS.

Válvula	V5	V6	V9	V7	V8	V7
Estado	C	A	C	C	A	C

3. CONDICIONES TÉCNICAS

3.1. Introducción

La siguiente normativa desarrollada comprende todos los aspectos técnicos de los componentes de la instalación de almacenamiento térmico con cambio de fase, métodos de ensayo, nomenclaturas, definiciones, normativa de seguridad hacia las personas y medio ambiente, consideraciones de utilización de los refrigerantes, diseño, construcción y puesta en marcha.

Todos los conceptos han sido extraídos de la normativa europea UNE-EN de sistemas de refrigeración que comparten características similares al sistema instalado para realizar este proyecto, pues se trata de una instalación de Investigación y Desarrollo en un campo todavía sin normativa propia específica. Adicionalmente, se ha completado la información con el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (2007).

3.2. Requisitos de seguridad y medio ambiente

3.2.1. Introducción

La norma europea EN 378-1:2000 incluye todos los aspectos relacionados con los conceptos de seguridad y medio ambiente. Esta norma europea hace referencia a los requisitos de seguridad y medio ambiente para el diseño, fabricación, construcción, funcionamiento, instalación, mantenimiento y eliminación de los sistemas y equipos de refrigeración en relación con el aspecto al medio ambiente local y global.

Se pretende minimizar en lo posible los riesgos en la instalación a personas, bienes y al medio ambiente. Estos riesgos están asociados esencialmente con las características físicas y químicas del refrigerante y de los fluidos caloportadores, así como con las presiones y temperaturas existentes en los circuitos.

La adopción insuficiente de precauciones en la instalación puede tener las siguientes consecuencias:

- Rotura de un componente, o incluso explosión con riesgo de proyección de materiales.
- Escape del refrigerante debido a una rotura, fugas por deficiencias en el diseño, funcionamiento incorrecto y mantenimiento, reparaciones, carga, desmantelamiento o desecho inadecuado.

Los riesgos a causa del nivel de presión y temperatura del sistema de refrigeración se deben, principalmente, a la presencia simultánea de las fases vapor y líquido. Asimismo, el estado del refrigerante y las presiones que ejerce sobre los diversos

componentes no depende solamente de los procesos y funciones en el interior de la instalación, sino también de factores externos.

Tiene importancia la consideración de los siguientes riesgos en la instalación diseñada:

- a) Por efecto directo de las bajas temperaturas, por ejemplo:
- Fragilidad de los materiales a bajas temperaturas.
 - Congelación del líquido contenido (agua, salmuera o similar).
 - Tensiones térmicas.
 - Cambios de volumen debido a las variaciones de temperatura.
 - Daños a las personas, causados por las bajas temperaturas.
- b) Por la excesiva presión, por causa, por ejemplo:
- Al incremento de la presión de condensación, causada por enfriamiento inadecuado, por la presión parcial de incondensables o por una acumulación de aceite o refrigerante en la fase líquida.
 - Al incremento de la presión del vaso saturado debido a un calentamiento externo excesivo, por ejemplo de un líquido enfriador, o cuando se efectúa el desescarche de un enfriador de aire, o debido a la elevada temperatura ambiente cuando la planta está parada.
 - La expansión del refrigerante en fase líquida en un espacio cerrado sin la presencia de vapor, originada por una elevación de la temperatura exterior.
 - Fuego.
- c) Por el efecto directo de la fase líquida, por ejemplo:
- Excesiva carga o inundación del equipo objeto de ensayo.
 - Golpe de ariete en las tuberías.
 - Falta de lubricación debida a la emulsión del aceite del compresor.
- d) Por las partes móviles de la maquinaria, por ejemplo:
- Lesiones.
 - Pérdida auditiva a consecuencia de un excesivo nivel de ruido.
 - Averías debidas a vibraciones.

3.2.2. Objeto y campo de aplicación

Esta norma europea establece los requisitos relacionados con la seguridad de las personas y bienes, pero no de los productos almacenados, y con el medio ambiente local y global en:

- Sistemas de refrigeración fijos y móviles de cualquier dimensión, incluidas las bombas de calor.
- Sistemas secundarios de enfriamiento o calefacción; y el emplazamiento de estos sistemas de refrigeración.

En la introducción se exponen los riesgos que se tratan. Además, la maquinaria debe cumplir adecuadamente con la UNE-EN 292-1 y la UNE-EN 292-2, en cuanto a los riesgos que no estén cubiertos en esta norma.

3.2.3. Definiciones

Para los propósitos de esta norma europea, son aplicables las siguientes definiciones:

- Sistemas de refrigeración
 - Sistemas de refrigeración (bomba de calor): conjunto de componentes interconectados que contienen refrigerante y que constituyen un circuito frigorífico cerrado, en el cual el refrigerante circula con el propósito de extraer o ceder calor, es decir, enfriar o calentar.
 - Sistema secundario de enfriamiento o calefacción: sistema que emplea un fluido para transferir calor de los productos o espacios a enfriar o calentar, o de otro sistema de enfriamiento o calefacción, al sistema de refrigeración.
 - Sistema cerrado: sistema de refrigeración en el que todas las partes por las que circula el refrigerante están conectadas herméticamente mediante bridas, uniones roscadas o conexiones similares.
 - Sector de alta presión: parte de un sistema de refrigeración que trabaja, aproximadamente, a la presión de condensación.
 - Sector de baja presión: parte de un sistema de refrigeración que trabaja aproximadamente, a la presión de evaporación.
- Presiones
 - Presión manométrica: presión cuyo valor es igual a la diferencia algebraica entre la presión absoluta y la presión atmosférica. A menos que se indique lo contrario, todas las presiones se entenderán manométricas.

- Presión máxima admisible: presión máxima para la que el equipo está diseñado, de acuerdo con la especificación del fabricante.
 - Presión límite de trabajo que no debe sobrepasarse, tanto si el sistema funciona como si está parado.
 - Presión de diseño: presión elegida para determinar la presión de cálculo de cada componente. Se utiliza para determinar los materiales necesarios, espesor y construcción de los componentes atendiendo a su capacidad para resistir la presión.
 - Presión de ensayo de resistencia: presión que se aplica para ensayar la resistencia de un sistema de refrigeración o cualquier parte del mismo.
 - Presión de ensayo de estanqueidad: presión que se aplica para ensayar la estanqueidad de un sistema o cualquier parte del mismo.
 - Presión máxima declarada: presión declarada por el fabricante del componente o del dispositivo hasta la cual éste puede ser sometido sin afectar a sus prestaciones.
 - Resistencia límite de un sistema: presión a la cual una parte del sistema rompe o revienta.
-
- Componentes de los sistemas de refrigeración
 - Instalación frigorífica: montaje de los componentes de un sistema de refrigeración y de todos los elementos necesarios para su funcionamiento.
 - Componentes frigoríficos: componentes que forman parte del sistema de refrigeración, por ejemplo, compresor, condensador, generador, absorbedor, depósito de líquido, evaporador, separador de partículas de líquido.
 - Recipiente a presión: cualquier parte del sistema de refrigeración que contiene refrigerante, exceptuando:
 - Bombas.
 - Evaporadores, en los que cada sección por separado no supere en más de 15 l el volumen que contiene refrigerante.
 - Serpentes y baterías.
 - Tuberías y sus válvulas, uniones y accesorios.
 - Dispositivos de control.
 - Colectores y otros componentes que tengan un diámetro interno no superior a 152 mm y un volumen interior neto no superior a 100 l.
 - Condensador: intercambiador de calor en el que el refrigerante en fase de vapor se licua por cesión de calor.

- Recipiente líquido: recipiente conectado permanentemente al sistema mediante tuberías de entrada y salida, utilizado para la acumulación de refrigerante líquido.
 - Evaporador: intercambiador de calor en el cual el refrigerante líquido se vaporiza por absorción de calor del medio a enfriar.
 - Serpentin: parte del sistema de refrigeración construido con tubos curvos o rectos convenientemente conectados,, que sirve como intercambiador de calor (evaporador o condensador).
 - Volumen bruto interno: volumen calculado conforme a las dimensiones interiores del recipiente, sin tener en cuenta el volumen ocupado por cualquier parte interna.
 - Volumen neto interno: volumen calculado conforme a las dimensiones interiores del recipiente deducido ocupado por las partes internas.
-
- Tuberías, uniones y accesorios:
 - Red de tuberías: tuberías o tubos (incluidas mangueras, compensadores o tubería flexible) para la interconexión entre las diferentes partes de un sistema de refrigeración.
 - Unión: conexión realizada entre dos partes.
 - Unión por soldadura: unión obtenida por ensamblaje de partes metálicas en estado plástico o de fusión.
 - Unión por soldadura blanda: unión obtenida por ensamblado de partes metálicas mediante mezcla de metales o aleaciones que funden a temperaturas generalmente comprendidas entre 200 °C y 450 °C.
 - Unión embreada: unión realizada atornillando entre sí un par de terminaciones con brida.
 - Unión abocardada: unión metálica a presión, en la cual se realiza un ensanchamiento cónico en el extremo del tubo.
 - Unión roscada: unión entre tuberías que no precisa de ningún material de sellado, por ejemplo, unión roscada con un aro de metal deformable por compresión.
 - Unión cónica roscada: unión de tubo roscado que requiere material de relleno con el fin de sellar las ranuras de la rosca.
 - Colector o distribuidor: tubería o tubo de un sistema de refrigeración al cual se conectan varias tuberías o tubos.
 - Dispositivo de: seccionamiento: dispositivo para interrumpir el flujo del fluido; por ejemplo, refrigerante, salmuera.

- Válvulas de interconexión: pares de válvulas de cierre que aíslan partes del circuito frigorífico y están dispuestas para que estas secciones puedan unirse antes de la apertura de las válvulas o separarse después de cerrarlas.
- Válvula de cierre rápido: dispositivo de corte que cierra automáticamente (por ejemplo por peso, fuerza de un resorte, bola de cierre rápido) o tiene un ángulo de cierre muy pequeño.

- Accesorios de seguridad
 - Dispositivos de alivio de presión: válvula de alivio de presión o disco de rotura, diseñados para aliviar automáticamente el exceso de presión.
 - Válvula de alivio de presión: válvula accionada por presión que se mantiene cerrada mediante un resorte u otros medios y que está diseñada para eliminar la excesiva presión de forma automática, al abrir a una presión no superior a la máxima admisible y cerrando de nuevo después de que la presión haya descendido por debajo del valor admisible.
 - Disco de rotura: disco o lámina cuya rotura se produce con un diferencial de presión predeterminado.
 - Dispositivo limitador de la temperatura: dispositivo accionado por la temperatura, diseñado para evitar temperaturas que se consideran peligrosas.
 - Dispositivo de seguridad limitador de presión: dispositivo accionado por presión, diseñado para detener el funcionamiento del generador de presión.
 - Dispositivo de seguridad limitador de presión máxima sometido a un ensayo de tipo: dispositivo sometido a un ensayo de tipo, diseñado para en caso de fallo o disfunción del propio instrumento, éste interrumpa el suministro de tensión al equipo.
 - Válvula de tres vías: válvula que controla dos dispositivos de seguridad y cuya disposición se realiza de manera que en cualquier momento solo uno pueda quedar fuera de servicio.

- Fluidos
 - Refrigerante: fluido usado para transferencia de calor en un sistema de refrigeración que absorbe calor a temperatura y presión bajas y lo cede a temperatura y presión elevadas, lo que normalmente conlleva cambios de fase líquido del fluido.

- Fluido secundario: fluidos (por ejemplo: agua, agua-glicol, salmuera, aire) para la transmisión de calor sin cambio de fase.

3.2.4. Instalación, puesta en marcha

- Instalación en relación con la ocupación

Los refrigerantes y sistemas de refrigeración se deben seleccionar, instalar y utilizar con arreglo a las categorías de ocupación de los locales, de forma que se semejan sin riesgo para las personas.

Las descargas de refrigerante a la atmósfera se deben minimizar. Las descargas inevitables de refrigerantes se deben realizar de forma que no se pongan en peligro a personas.

- Dispositivos de protección, tuberías y sus accesorios

Los dispositivos de protección, tuberías y sus accesorios se protegerán, en lo posible, contra efectos climáticos adversos y a la acumulación de suciedad o residuos.

- Instalación eléctrica

El diseño, construcción, instalación, prueba y utilización del equipo eléctrico debe ser conforme con la correspondiente Norma Europea, por ejemplo: EN 60204-1, EN 60335-1, EN 60335-2-24:1997, EN 60335-2-34, EN 60335-2-40.

3.2.5. Pruebas y marcado

- Pruebas (en relación con la seguridad y protección del medio ambiente)

Antes de poner en marcha cualquier sistema de refrigeración, todos los componentes del mismo o el sistema de refrigeración completo deben superar las siguientes pruebas:

- Prueba de resistencia a presión.
- Prueba de estanqueidad.
- Prueba de funcionamiento de los dispositivos de seguridad.
- Prueba de la instalación completa antes de su puesta en marcha.

Los dispositivos de seguridad principales deben comprobarse regularmente y los resultados de estas pruebas deben quedar registrados.

- Marcado

Todo sistema de refrigeración y sus componentes principales deben estar identificados mediante un distintivo, colocado éste de forma visible. Los dispositivos de cierre, mando y control principales deben estar convenientemente identificados en caso de que no resulte obvia su función.

3.2.6. Funcionamiento y mantenimiento

- Instrucciones de funcionamiento

Deberán prepararse instrucciones de funcionamiento de los sistemas de refrigeración, dando directrices de manejo y mantenimiento del sistema, incluyendo las precauciones a adoptar en caso de avería o fuga.

- Mantenimiento y reparaciones

Las revisiones y reparaciones de los sistemas de refrigeración se deben realizar solamente por personal cualificado.

El personal responsable deba tener conocimiento y experiencia del modo de funcionamiento, utilización y el control diario del sistema de refrigeración completo.

Equipo de protección personal. El equipo de protección del personal, apropiado a la cantidad y características del refrigerante, debe estar fácilmente disponible.

3.3. Diseño y construcción de los sistemas de refrigeración

La norma europea EN 378-2:2000 se aplicará al diseño y construcción del sistema de refrigeración y a sus componentes y materiales empleados, incluyendo tuberías. En ella también quedarán especificados los requisitos para ensayos, puesta en marcha, marcado y documentación.

3.3.1. Requisitos generales

- Riesgo para las personas, los bienes y el medio ambiente

Los sistemas de refrigeración y sus componentes se deben diseñar y construir evitando los posibles riesgos para las personas, los bienes y el medio ambiente.

- Carga de refrigerante

Los sistemas de refrigeración se deben diseñar de tal manera que la carga de refrigerante se mantenga tan pequeña como sea razonablemente posible.

3.3.2. Requisitos relativos a la presión

- Presión máxima admisible (Ps).

La presión máxima admisible se debe determinar teniendo en cuenta factores tales como:

- Temperatura ambiente
 - Acumulación de gases no condensables
 - Ajuste de cualquier dispositivo de alivio de presión
 - Método de desescarche
 - Aplicación
 - Radiación solar
 - Ensuciamiento
-
- Recipientes a presión
 - Requisitos generales

Los recipientes a presión deben cumplir con las correspondientes normas europeas existentes.

Los requisitos técnicos para los equipos a presión tal como se definen en la Directiva 97/23/CE están dados en la norma europea sobre “Aparatos a presión para sistemas de refrigeración y bombas de calor. Parte 1: Recipientes. Requisitos generales” que se encuentra en elaboración.

3.3.3. Unión de tuberías

- Requisitos generales

Las tuberías con diferentes diámetros sólo se conectarán utilizando accesorios de reducción de diámetro hechos en fábrica.

Serán preferibles las uniones fijas a las desmontables, las uniones embridadas a las uniones abocardadas, roscadas o de compresión, especialmente cuando se puedan producir vibraciones. No se recomiendan los acoplamientos de cierre rápido.

Se recomienda que en las tuberías aisladas la posición de las unidades desmontables esté permanentemente marcada.

- Uniones no desmontables

Requisitos generales: en uniones no desmontables se deben utilizar soldaduras fuertes o blandas. Durante la ejecución de cualquier soldadura fuerte o blanda se evitarán las impurezas causadas por la formación de óxido, por ejemplo utilizando gas inerte o eliminándolas. Podrán usarse otras uniones no desmontables, siempre que su idoneidad haya sido probada.

Soldadura: la soldadura debe cumplir con la norma europea correspondiente. Cuando se seleccione el procedimiento de soldadura, se considerarán las temperaturas de la operación, materiales a unir y composición del material de aporte.

Los accesorios, para soldadura a tope, serán compatibles con el material de la tubería.

Soldadura fuerte: la compatibilidad de todos los materiales, incluidos el material de aporte y el fundente, con el refrigerante será determinada minuciosamente mediante ensayo. Debe tenerse en cuenta la posibilidad de corrosión.

La soldadura fuerte sólo se efectuará por personal cualificado en este campo. Se podrán utilizar otras uniones no desmontables cuando su validez haya sido probada.

- Uniones desmontables

Uniones embridadas: las uniones embridadas se deben disponer de tal forma que las partes conectadas puedan desmontarse con una mínima deformación de la tubería.

Será preferible utilizar bridas normalizadas para las tuberías de acero y bridas normalizadas con cuello prolongado para soldar en el caso de tuberías de cobre.

Las uniones deben ser sólidas y suficientemente resistentes para evitar cualquier daño a la junta que se inserte. Son preferibles las bridas acanaladas (diente/ranura) o las bridas con cajeado (macho/hembra). El desmontaje debe ser sin forzar a los componentes unidos.

Se debe tomar la precaución de no sobretensar los tornillos que operan en frío, cuando se aplica un par de apriete predefinido.

Uniones abocardadas: No se deben utilizar las uniones abocardadas para la conexión de válvulas de expansión. Se evitarán las uniones abocardadas donde sea razonablemente posible. Se debe limitar el uso de uniones abocardadas a tuberías recocidas cuyo diámetro exterior no exceda de 19 mm y no se utilizará con tuberías de cobre y aluminio de diámetro exterior menor de 9 mm.

Cuando se realicen uniones abocardadas, deben tomarse precauciones para asegurar que el abocardado es del tamaño correcto y que el par utilizado para apretar la tuerca no es excesivo. Es importante que las superficies roscadas y de deslizamiento sean lubricadas antes de su unión. No deben ser abocardadas las tuberías cuyo material haya sido endurecido por manipulación en frío.

Las uniones a compresión roscadas serán una alternativa preferible a las uniones abocardadas.

Uniones cónicas roscadas: Las uniones cónicas roscadas sólo se deben utilizar para conectar dispositivos de medida y de control. Las uniones cónicas roscadas serán de construcción sólida y suficientemente probado.

No deberán utilizarse materiales de relleno y sellos en las roscas que no estén debidamente probados.

- Trazado de tuberías

Debe tenerse en cuenta la disposición física, en particular la posición de cada tubería, las condiciones de flujo (flujo en dos fases, retorno de aceite funcionamiento a carga parcial), condensaciones, dilatación térmica, vibraciones y buena accesibilidad.

El trazo y soporte de las tuberías tienen un importante efecto en la fiabilidad del funcionamiento y mantenimiento del sistema de refrigeración. Las tuberías se soportarán adecuadamente de acuerdo con su tamaño y peso en servicio.

Se deben tomar precauciones para evitar pulsaciones o vibraciones excesivas. Se pondrá especial atención en prevenir la transición directa de ruidos y vibraciones a través de la estructura soporte.

3.3.4. Válvulas y dispositivos de protección

- Requisitos generales

Si se utilizan dispositivos de seguridad para prevenir presiones excesivas, durante el funcionamiento debe preverse, siempre que sea factible, un limitador de presión que pare el generador de presión antes de que actúe algún dispositivo de seguridad (válvula, disco) con descarga a la atmósfera.

Para aliviar la presión de componentes en el lado de alta son preferibles, siempre que sea posible, dispositivos con descarga al lado de baja frente a aquellos que descarguen a la atmósfera. Es preferible una válvula de seguridad a un disco de rotura o a un tapón fusible. Si con fines de seguridad se utilizan dispositivos limitadores de temperatura, deben instalarse de manera que la temperatura detectada esté vinculada con la seguridad.

- Protección del sistema de refrigeración

Requisitos generales: cada sistema de refrigeración debe estar protegido con al menos un dispositivo de alivio, tapón fusible u otro medio diseñado para aliviar la presión excesiva o bien estar protegido contra sobrepresión. Se exceptúan los sistemas compactos unitarios, con hasta 1 Kg de refrigerante del grupo L3, los cuales no precisan estar equipados con dispositivo de alivio de presión.

Dispositivos limitadores de alta presión o temperatura: todos los sistemas construidos en los que el generador de presión pueda producir presiones superiores a la máxima admisible de los mismos deben estar provistos con al menos un dispositivo de seguridad limitador de presión o temperatura.

Limitador de presión: todas las instalaciones en las que exista el riesgo de temperaturas bajas deben estar provistas de un limitador de presión según la Norma EN 12263, por ejemplo: para evitar congelaciones en los enfriadores de líquidos y la disminución de la resistencia al impacto (resiliencia de los materiales utilizados).

- Protección de los componentes del sistema

Requisitos generales: puede preverse un dispositivo de alivio de la presión común para varios componentes, siempre que:

- a) Dichos componentes no puedan independizarse unos de otros.
- b) La capacidad de evacuación del dispositivo de alivio sea tal que proteja a todos los componentes contra una sobrepresión simultánea en lo mismos.

Protección de recipientes a presión: dispositivos de alivio de presión. Los recipientes que puedan contener refrigerante líquido y ser independizados de otras partes del sistema de refrigeración, excepto aquellos cuyo diámetro nominal interior sea a 152 mm, deben estar protegidos mediante un depósito de alivio.

Dilatación térmica del líquido. Los componentes del sistema que queden completamente inundados por refrigerante líquido y puedan ser independizados del resto de la instalación, deben estar protegidos contra rotura por la dilatación térmica del líquido.

- Disposición de los elementos de seguridad (alivio de presión)

Requisitos generales: los elementos o dispositivos de alivio de presión deben estar conectados lo más cerca posible a los recipientes de presión o componentes que protegen. Deben ser fácilmente accesibles y, salvo cuando protegen contra sobretensiones por dilatación térmica del líquido, deben estar conectadas en la parte más alta posible, siempre por encima del nivel de líquido. La pérdida de presión entre el componente a proteger y la válvula (dispositivo) de alivio no debe ser superior al valor límite indicado por el fabricante del mismo.

- Instrumentos de indicación y medida
 - Requisitos generales

Los sistemas de refrigeración deben estar equipados con los instrumentos de indicación y medida necesarios para los ensayos, funcionamiento y mantenimiento tal como se especifica en esta norma europea.

- Indicadores de presión para refrigerante

Calibración y marcado: las especificaciones en este apartado afectan sólo a instrumentos instalados de forma permanente en los equipos. Los indicadores de

presión e el lado de alta deben estar calibrados, como mínimo, hasta la presión máxima admisible.

- Instalación

Cada lado o etapa de presión de un sistema de refrigeración debe estar provisto de indicadores de presión.

3.4. Ensayos y puesta en marcha

Para cada equipo y aparato deberá realizarse una ficha técnica en la que sean incluidos todos los parámetros de funcionamiento del equipo o aparato y, en su caso, sus accesorios.

Se deberán indicar las magnitudes previstas en proyecto y, al lado, las magnitudes medidas en obra. Las diferencia entre las dos servirán para efectuar el ajuste y equilibrado de la instalación.

Es de fundamental importancia dejar constancia de los datos de proyecto y de los datos de los ensayos en obra para la empresa o persona que se hará cargo del mantenimiento de la instalación.

3.4.1. Ensayos

Antes de la puesta en marcha de un sistema de refrigeración todos sus componentes o el circuito de la instalación deben someterse a los siguientes ensayos:

- Ensayo de resistencia a la presión.
- Ensayo de estanqueidad.
- Ensayo funcional de todos los dispositivos de seguridad.

Todos los componentes de un sistema de refrigeración deben ser sometidos a un ensayo de resistencia a la presión y posteriormente a la prueba de estanqueidad correspondiente.

3.4.2. Resultados de los ensayos

- Ensayo de resistencia a la presión de los componentes

Todos los componentes deben ser sometidos a una prueba de resistencia a la presión, bien antes de salir de fábrica o en su defecto en el lugar de emplazamiento.

Los indicadores de presión y dispositivos de control pueden ser probados a presiones inferiores, pero no por debajo de la máxima admisible.

- Fluidos para ensayos de resistencia a la presión

El ensayo de resistencia a la presión debe ser de tipo hidráulico utilizando agua u otro líquido adecuado, excepto cuando por razones técnicas, el componente no deba probarse con líquido; en tal caso podrá utilizarse para el ensayo un gas que no sea peligroso y sea compatible con el refrigerante y los materiales del sistema.

- Ensayo de presión en los sistemas de refrigeración

Después del montaje, en fábrica o en el lugar de emplazamiento, y con anterioridad a la puesta en marcha, todo sistema será sometido a un ensayo de presión, igual a la presión de diseño, mediante gas no peligroso.

- Prueba de estanqueidad

El sistema de refrigeración debe ser sometido a una prueba de estanqueidad bien como conjunto o por sectores. Este ensayo podrá realizarse antes de salir el equipo de fábrica, si el montaje se realiza en ésta, o bien in situ, si el montaje o la carga de refrigerante se hace en el lugar de emplazamiento.

- Procedimiento de vacío

Vacío (absoluto). Extraer la humedad mediante vacío a temperatura no es un proceso efectivo y no debe ser utilizado para tal fin.

- Ensayo del conjunto de la instalación antes de su puesta en marcha

Antes de poner en funcionamiento un sistema de refrigeración se debe comprobar el mismo en su totalidad. Se verifica que la instalación está de acuerdo con los planos constructivos, los diagramas de flujo, tuberías e instrumentación, control y esquemas eléctricos.

DOCUMENTO
Nº3:
PRESUPUESTO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	COSTES DE LA MANO DE OBRA	2
3.	COSTES DE EQUIPOS Y ACCESORIOS DE LA INSTALACIÓN	3
4.	COSTES DE SUBCONTRATACIONES.....	4
5.	COSTES DE FABRICACIÓN DEL DEPÓSITO COMPACTO	5
6.	COSTE TOTAL DEL PROYECTO.....	6
	ANEXOS	8
	Presupuesto P697210 de Ageval.....	8
	Presupuesto P696610 de Ageval.....	9
	Presupuesto 266/2011 de Prominox	10

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento describe todos los costes asociados al proyecto de “Diseño y puesta a punto de las instalaciones experimentales de almacenamiento latente de energía térmica para el Instituto de Ingeniería Energética”.

En cada capítulo se han desglosado ordenadamente los costes parciales respectivos, y se ha añadido una fracción de costes indirectos equivalente al 1,5% del total de la partida. Se han incluido también los costes de los equipos que se han utilizado en el proyecto pero que ya habían sido adquiridos por el IIE para otras instalaciones.

2. COSTES DE LA MANO DE OBRA

En este capítulo se han detallado todos los gastos de mano de obra no subcontratada asociados al proyecto, tal y como muestra la Tabla 1. Se han recopilado los costes de todos los profesionales requeridos a lo largo de las distintas fases del proyecto, desde el diseño y puesta a punto de la instalación y el análisis de los resultados generados, hasta el diseño y fabricación del depósito compacto.

El precio unitario de la hora trabajada de cada profesional son valores actuales de facturación en el mercado, teniendo en cuenta tanto pagos a la seguridad social y desempleo, como pagas extraordinarias y vacaciones. El coste de la mano de obra indirecta se ha incluido en el Capítulo 4.

CATEGORÍA	TIEMPO (h)	PRECIO UNITARIO (€/h)	TOTAL (€)
Ingeniero especialista en energía	100	45	4500
Ingeniero especialista en refrigeración	60	45	2700
Oficial 1ª refrigeración	150	30	4500
Ayudante refrigeración	150	24	3600
Ingeniero especialista en automática y control	50	40	2000
Oficial 1ª electricidad	100	30	3000
Ayudante electricidad	120	18	2160
Oficial 1ª fontanería	160	25	4000
Ayudante fontanería	160	27	4320
Ingeniero especialista en diseño de producto	60	30	1800
Ingeniero especialista en materiales	80	30	2400
Ingeniero especialista en mecánica	60	30	1800
Total			36780

Tabla 1. Costes de la mano de obra directa

3. COSTES DE EQUIPOS Y ACCESORIOS DE LA INSTALACIÓN

A continuación se desglosan en la Tabla 2 los costes de los equipos y materiales necesarios en la instalación de almacenamiento térmico con cambio de fase. Estos costes han sido agrupados a su vez en dos subgrupos, los equipos pertenecientes a los circuitos hidráulicos y frigorífico, y los relativos al control y adquisición de datos en la instalación.

CONCEPTO	MEDICIÓN	PRECIO UNITARIO (€/Ud.)	TOTAL (€)
Circuitos hidráulicos y frigorífico			
Depósito 1098C CALMAC Icebank	1	7950.00	7950.00
Intercambiador de calor SWEP modelo B10THx40	1	498.00	498.00
Intercambiador de calor SWEP modelo B25Tx60	1	1204.00	1204.00
Bomba Grundfos CRE 5-5	1	1580.15	1580.15
Bomba Grundfos CH4-50	1	270.54	270.54
Válvulas de 3 vías PN16 SIEMENS	2	337.50	675.00
Racord 1 1/2"SIEMENS	2	19.26	38.52
Actuador electrohidráulico SKD 62 SIEMENS	2	621.09	1242.18
Calefactor de vástago ASZ 6.5 SIEMENS	1	191.90	191.90
Material fontanería	1	300.00	300.00
Material eléctrico	1	100.00	100.00
Chiller 8 kW	1	7147.00	7147.00
Control y adquisición de datos			
Data logger 34970A	1	1281.00	1281.00
Multiplexor HP 34901A	3	386.00	1158.00
Termoresistencias Pt100	2	100.00	200.00
Rollo de termopar Tipo T (400 m)	2	460.00	920.00
Transductor de presión SPKT D0 CAREL	1	80.51	80.51
Transductor de presión Fisher ROSEMOUNT 3051	1	1151.00	1151.00
Coriolis MASS 2100 DI 15 de SIEMENS	1	3973.00	3973.00
PID WATLOW Series 96	1	293.18	293.18
PID PMA KS 90-1	1	390.26	390.26
Ordenador personal Intel Core 2 Duo	1	873.00	873.00
Gastos indirectos	1.5%	31500	472.50
Total			31989.74

Tabla 2. Costes de equipos y accesorios de la instalación de PCMs

4. COSTES DE SUBCONTRATACIONES

En la Tabla 3 se desglosan los gastos asociados al proyecto en concepto de subcontrataciones. Estos trabajos han sido ejecutados por la empresa Ageval Servicios S.L. y los presupuestos relacionados se pueden consultar en los ANEXOS. Estos gastos han sido divididos en dos subgrupos, los relacionados con los circuitos hidráulicos de la instalación, y por otro lado, los trabajos eléctricos.

CONCEPTO	
Trabajos hidráulicos (Presupuesto P6101410 + P697210 + CIERRE OBRA de AGEVAL Servicios)	
Realización de dos picajes en acero inoxidable en las tuberías de agua de condensación y calefacción del laboratorio	
Fabricación y montaje de instalación de almacenamiento térmico con cambio de fase según especificaciones de diseño	
Depósito de inercia de 1000 l (transporte incluido)	
Depósito de inercia de 300 l (transporte incluido)	
Dos bidones de glicol de 220 l (transporte incluido)	
Vaso de expansión de 35 l	
Subtotal	15411.58 €
Trabajos eléctricos (Presupuesto P696610 de AGEVAL Servicios)	
Montaje de un cuadro metálico de 800x800x250 según esquema eléctrico	
Bandeja de PVC con tapa 60x100 y accesorios	
Línea eléctrica libre de halógenos de 5x10mm ²	
Línea eléctrica libre de halógenos de 4x2.5mm ²	
Línea eléctrica libre de halógenos de 5x6mm ²	
Montaje de un interruptor automático magnetotérmico de 4x80A	
Montaje de un interruptor diferencial 4x80A 300mA	
Instalación de una acometida de 5x25mm ² por bandeja hasta el nuevo cuadro	
Subtotal	9745.04 €
Total	25156.62 €

Tabla 3. Coste de subcontrataciones en la instalación de PCMs

5. COSTES DE FABRICACIÓN DEL DEPÓSITO COMPACTO

Éste capítulo resume todos los gastos referentes a la fabricación del depósito compacto descrito en el Capítulo 8 de la Memoria. La Tabla 4 recopila estos gastos en dos grupos, los costes de fabricación de la vasija por Prominox S.L.L. (véase ANEXOS) y los costes de fabricación del intercambiador.

CONCEPTO	MEDICIÓN	PRECIO UNITARIO (€/Ud.)	TOTAL (€)
Fabricación de la vasija (PROMINOX SLL presupuesto 266/2011)			
Fabricación depósito de 500l en acero inoxidable AISI 316	1	1700.00	2006.00
Aislamiento de poliuretano 150mm	1	1460.00	1722.80
Transporte	1	275.00	324.50
Estructura para el intercambiador en AISI 316	1	87.00	102.66
Pletinas para el intercambiador en AISI 316	25	10.00	295.00
Subtotal			4608.37
Fabricación del intercambiador			
Accesorios de fontanería para los colectores (MAEZTU S.L. presupuesto 27-10-2011)	1	284.27	284.27
Rollo 15m cobre recocido 5/8"	8	59.00	472
Subtotal			756.27
Gastos indirectos	1.5%	5340.00	80.1
Total			4608.37

Tabla 4. Costes de fabricación del depósito compacto

6. COSTE TOTAL DEL PROYECTO

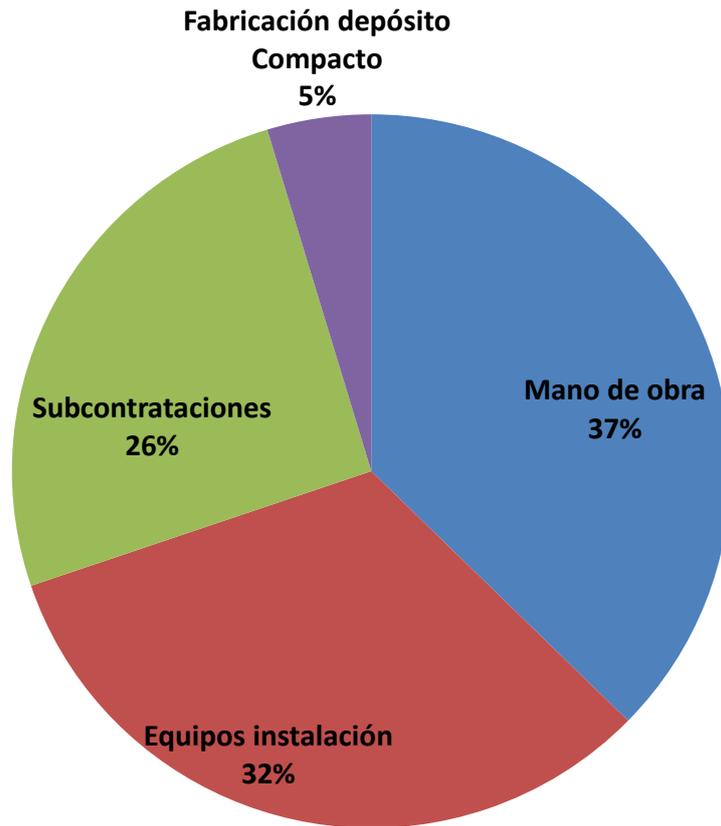
Finalmente, en el presente capítulo se analiza el coste total del proyecto. La Tabla 5 muestra la suma de todos los costes de los capítulos anteriores, el valor del subtotal y el coste final una vez aplicado el impuesto sobre el valor añadido (IVA).

CONCEPTO	COSTE (€)
Costes de la mano de obra directa	36780.00
Costes de equipos y accesorios de la instalación de PCMs	31989.74
Costes de subcontrataciones en la instalación de PCMs	25156.62
Costes de fabricación del depósito compacto	4608.37
Subtotal	98534.73
I.V.A. (18%)	17736.25
TOTAL	116270.98 €

Tabla 5. Resumen de los costes parciales del proyecto

En total, el presupuesto del proyecto “Diseño y puesta a punto de las instalaciones experimentales de almacenamiento latente de energía térmica para el Instituto de Ingeniería Energética”, cuyo contenido se ha detallado en el Documento Nº1, asciende a 116270.98 € #CIENTODIECISEISMIL DOSCIENTOS SETENTA EUROS Y NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS#.

La Figura 1 muestra el peso que tiene cada capítulo frente al coste total del proyecto. 32% del presupuesto total corresponde a los equipos y material de la instalación. En la fase de construcción de la instalación, fue necesario subcontratar ciertos trabajos de fontanería y electricidad, con un peso de 26% respecto al total del proyecto. El coste del depósito compacto es en sí bajo, aunque para su diseño han sido necesarios varios meses de trabajo, los cuales se reflejan en la mano de obra. Finalmente, cabe destacar que el gran peso de la mano de obra (37% del presupuesto) refleja que en este proyecto han sido necesarias muchas horas de trabajo de personal cualificado, para poder diseñar apropiadamente tanto la instalación como el depósito compacto, y analizar los procesos dinámicos de carga y descarga con agua/hielo.



PRESUPUESTO TOTAL: 116270.98 €

Figura 1. Desglose de los costes del proyecto

ANEXOS

Presupuesto P697210 de Ageval

Ageval Servicio
Grupo Dalkia

Edificio Trade Center
C/ Profesor Beltrán Báuena, 4
Despacho 105 c - 46009 VALENCIA
Tel.: 963355781 - Fax: 963488927
Averías: 963355789
ageval@ageval.es

07/10/2010

UPV IIE VALENCIA

Presupuesto Nº: P697210

Pág. 1/1

Unid.	Concepto	Precio	Total
MATERIAL Y TRABAJOS DE FONTANERIA			

- SE REALIZARAN 2 PICAJES DE INOXIDABLE EN EL TALLER DE INGENIERIA MECANICA PARA SU POSTERIOR CONEXIÓN CON EL COBRE.
- A CONTINUACION SE CAMBIARA LA UBICACIÓN DE LA INSTALACION DE COBRE DEL TALLER MODIFICANDOSE LA TUBERIA DE 3 CIRCUITOS PARA SU NUEVO EMPLAZAMIENTO.
- FABRICACION Y MONTAJE DE INSTALACION PARA PRODUCCION DE HIELO A BASE DE GLICOL A -10°C.

La forma de pago será la habitual con ustedes o en caso de no haber forma de pago será de un recibo negociable a 30 días F.F. con domiciliación bancaria.

BASE IMPONIBLE 7.840,53 €
IVA 1.411,30 €

Total presupuesto P697210 IVA INCLUIDO 9.251,83 €



Conforme Cliente:

[Handwritten signature]

JORGE PAYÁ HERRERO

Por Ageval Servicio S.A.: Fran Duarte
Dpto de Mantenimiento

Edificio Trade Center
C/ Profesor Beltrán Báuena, 4
Despacho 105 C - 46009 VALENCIA
Tel.: 96 335 57 81 - Fax: 96 340 63 27
Averías: 96 335 57 89
ageval@ageval.es

Presupuesto P696610 de Ageval

Ageval Servicio
Grupo Dalkia

05/10/2010

Edificio Trade Center
C/ Profesor Beltrán Báuena, 4
Despacho 105 c - 46009 VALENCIA
Tel.: 963355781 - Fax: 963488927
Averías: 963355789
ageval@ageval.es

UPV IIE VALENCIA

Presupuesto Nº: P696610

Pág. 1/1

Unid.	Concepto	Precio	Total
SUMINISTRO DEPOSITOS DE INERCIA Y PARTE ELECTRICA.			

- SUMINISTRO DE DOS DEPOSITOS DE INERCIA, UNO DE 1000LTS Y OTRO DE 300LTS.
- MONTAJE DE UN CUADRO METALICO DE 800X800X250 PARA ALBERGAR LOS 4 SELECTORES DE 0-1, 8 PILOTOS DE LEDS EN PUERTA VERDES-ROJOS, UN INTERRUPTOR GENERAL DE 4X80A, UN DIFERENCIAL DE 4X63A 300MA, UN DIFERENCIAL 4X25 300MA, UN DIERENCIAL DE 2X25A 30MA, TRES GV2 DE TEE, UN AUTOMATICO 4X50A, UN AUTOMATICO DE 2X10A, 3 CONTACTORES DE TEE 6A, UN CONTACTOR TETRAPOLAR 16A, COLOCANDO CANALETAS DE PLASTICO, GUIAS DIN, CABLECILLO, PUNTERAS, COLOCANDO CONTROLADOR DE SIEMENS EN EL CUADRO, UN TRAF0 230/24 DE 100VA.
- BANDEJA DE PVC CON TAPA 60X100+SOP Y ACCES.
- LINEA ELECTRICA LIBRE DE HALOGENOS DE 5X10MM DE SECCION.
- LINEA ELECTRICA LIBRE DE HALOGENOS DE 4X2,5MM DE SECCION.
- LINEA ELECTRICA LIBRE DE HALOGENOS DE 5X6MM DE SECCION.
- INSTALACION DE PUNTO DE CONTROL DIGITAL CON CABLE TRENZADO DE 2X0,8MM, LIBRE DE HALOGENOS, BAJO TUBO FLEXIBLE DE PVC M-20, TODO ELLO INSTALADO Y FUNCIONANDO.
- MONTAJE DE UN AUTOMATICO MAGNETOTERMICO DE 4X80A Y UN DIFERENCIAL DE 4X80A 300MA EN CUADRO GENERAL EXISTENTE.
- INSTALACION DE UNA ACOMETIDA DE 5X25 MM POR BANDEJAS EXISTENTES DESDE EL CUADRO GENERAL DEL LABORATORIO HASTA EL CUADRO SECUNDARIO NUEVO.
- SUMINISTRO DE UN VASO DE EXPANSION DE 35 LTS.

La forma de pago será la habitual con ustedes o en caso de no haber forma de pago será de un recibo negociable a 30 días F.F. con domiciliación bancaria.

BASE IMPONIBLE 9.745,04 €

IVA 1.754,11 €

Total presupuesto P696610 IVA INCLUIDO	11.499,15 €
---	--------------------

Conforme Cliente:

Por Ageval Servicio S.A.: Fran Duarte
Dpto de Mantenimiento



Jorge Payer Herrero

Ageval Servicio S.A.

Edificio Trade Center
C/ Profesor Beltrán Báuena, 4
Despacho 105 c - 46009 VALENCIA
Tel.: 96 335 57 81 - Fax: 96 343 63 27
Averías: 96 335 57 89
ageval@ageval.es

Presupuesto 266/2011 de Prominox

Prominox
Vdo., S.L.L.

* Calderería inox. Y Acero carbono
* Instalaciones alimentarias y derivadas
* Decoraciones Inox
Pol. Ind. C/ Leonardo Da Vinci, 12
Telf./Fax 967 14 01 27
02600 VILLARROBLEDO (Albacete)

PRESUPUESTO

Presupuesto N° 266/ 2011

Fecha: 17/10/2011

CONCEPTO:

INSTITUTO INGENIERÍA ENERGÉTICA

DEPOSITO 500 LITROS

CONTACTO: Alejandro López Navarro

MÓVIL: 661 70 38 69

Persona de contacto en Prominox Vdo S.L.L.: Ángel Calero 675 254 709

Unidades	Descripción	Precio unitario	Importe
	DEPÓSITO 500 L		
	CARACTERÍSTICAS	1.700,00 €	1.700,00 €
	Espesor 2,00 mm en fondo y 2 mm en virola Aisi 316 2B		
	Altura máxima por depósito aproximada 1.100 mm		
	Altura cilindro 542 mm		
	Diámetro 1.000 mm		
	Capacidad 500 litros		
3 Unidades	Patas encastradas de tubo inox Ø 114 mm		
1 Unidad	Peana perimetral interior Ø 1.004 mm y exterior Ø 1.084 mm con 12 taladros de m-12 y espesor 8 mm		
1 Unidad	Tapa superior exterior Ø 1.100 mm espesor 3 mm		
1 Unidad	Salida en fondo tubo Ø 2"		
1 Unidad	Entrada en tapa superior Ø 200 mm		
	Fondo inferior conico 10%		
1 Unidad	Entronque inox 2" Aisi 316		
1 Unidad	Codo inox Ø 2" Aisi 316		
1 Unidad	Valvula 2" Aisi 316		
1 Unidad	Brida registro Ø 300		
3 Unidades	Agarraderas inox con pletina 30x5		
	 AISLAMIENTO	1.460,00 €	1.460,00 €
	Aislamiento poliuretano espesor 150 mm 35 kg m2 en virola techo y fondo		
	Diámetro exterior 1.300 mm		
	TRANSPORTE HASTA SUS INSTALACIONES	275,00 €	275,00 €
	BASE DE TUBOS PLETINA 50X10 AISI 316	87,00 €	87,00 €
25 Unids	REGLETAS PARA INTERCAMBIADOR 295X66 MM ESPESOR 2 MM AISI 316	10,00 €	250,00 €

(IVA NO INCLUIDO)

TOTAL PRESUPUESTO:

3.772,00 €



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES**



**DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE LAS
INSTALACIONES EXPERIMENTALES DE
ALMACENAMIENTO LATENTE DE
ENERGÍA TÉRMICA PARA EL INSTITUTO
DE INGENIERÍA ENERGÉTICA**

PROYECTO FIN DE CARRERA

AUTOR:

ALEJANDRO LÓPEZ NAVARRO

DIRECTOR/A:

D. JORGE PAYÁ HERRERO

DIRECTOR/A

D. JOSÉ MIGUEL CORBERÁN SALVADOR

Valencia, 9 de febrero de 2012