



**industriales**  
etsii

**Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial**

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial**

**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN  
EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE  
SISTEMAS DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA  
SOLAR, BASADOS EN LA UTILIZACIÓN DE  
MATERIALES DE CAMBIO DE FASE.**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: Jonathan Moreno Villarroel**

Director: José Pérez García.

Cartagena, a 8 de Abril de 2018



**Universidad  
Politécnica  
de Cartagena**

# INDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes y justificación del proyecto.....	1
1.2 Objetivos del TFG.....	3
1.3 Fases del TFG.....	4
Capítulo 2. Sistemas solares térmicos de baja temperatura.....	4
2.1 Fundamentos de las instalaciones solares térmicas de baja temperatura.....	4
2.2 Clasificación de las instalaciones solares térmicas.....	6
Capítulo 3. Almacenamiento de energía. Materiales de cambio de fase.....	7
3.1 Clasificación de los PCM.....	9
3.1.1 PCM inorgánicos.....	10
3.1.2 PCM orgánicos.....	11
3.1.3 Eutécticos y mezclas de PCM.....	11
3.2 Propiedades de los Materiales de Cambio de Fase (PCM).....	12
3.2.1 Propiedades Físicas.....	12
3.2.2 Propiedades Cinéticas.....	12
3.2.3 Propiedades Químicas.....	12
3.2.4 Propiedades Térmicas.....	13
Capítulo 4. Revisión bibliográfica.....	13
4.1 Introducción.....	13
4.2 Revisión bibliográfica.....	13
4.3 Propiedades termo-físicas de los materiales de cambio de fase utilizados.....	21
4.4 Diseños de intercambiadores de calor para PCM.....	24
Capítulo 5. Análisis de la instalación disponible, especificación de los parámetros de diseño y propuesta de modificación.....	30
5.1 Descripción de la instalación disponible. Instrumentación.....	30
5.2 Especificación de los parámetros de diseño de la nueva instalación.....	32
5.2.1. Selección del PCM.....	33
5.2.2. Energía Disponible.....	34

5.2.3 Temperatura de operación. ....	38
5.2.4 Fluido de trabajo.....	38
5.2.5 Caudal.....	38
5.2.6 Prevención a sobrecalentamientos. ....	40
5.2.7. Prevención de flujo inverso .....	41
5.3 Adecuación de la instrumentación disponible. ....	41
5.4 Propuesta de modificación de la instalación actual. ....	42
5.4.1 Circuito primario. ....	43
5.4.2 Circuito secundario.....	47
5.5 Propuesta de diseño de los intercambiadores/acumuladores de PCM. ....	47
Capítulo 6. Especificación de los componentes de la nueva instalación .....	49
6.1 Especificación técnica de los componentes de la instalación. ....	49
6.1.1 Colectores solares de tubos de vacío. ....	49
6.1.2 Bomba del primario y secundario.....	53
6.1.3 Vaso de expansión.....	55
6.1.4 Intercambiador de placas termosoldadas. ....	56
6.1.5. Chiller.....	57
6.1.6. Tubería y aislamiento. ....	59
6.2 Caracterización experimental de componentes.....	59
6.2.1 Válvulas de regulación y control. ....	59
6.2.1.1 Descripción.....	59
6.2.1.2. Estudio experimental .....	62
6.2.1.3. Resultados obtenidos .....	65
6.2.2 Cálculo hidráulico del grupo de bombeo.....	80
6.2.2.1 Fundamentos .....	80
6.2.2.2 Datos de partida.....	81
6.3 Especificación técnica de la nueva instrumentación necesaria. ....	89
Capítulo 7. Resumen y conclusiones .....	92
Anexos	96
Referencias bibliográficas .....	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico instalación solar de baja temperatura.....	5
Figura 2. Almacenamiento térmico de energía.....	8
Figura 3. Relación almacenamiento energía- temperatura .....	9
Figura 4. Materiales de Cambio de Fase según su entalpía y temperatura de fusión.....	10
Figura 5. Instalación solar S.D. Sharma, T. Iwata, H. Kitano, K. Sagara.....	14
Figura 6. Esquema instalación solar investigación de Oluwaseun S. Alajo .....	15
Figura 7. Instalación solar investigación Oluwaseun S. Alajo, Victor C. Ibekwe, Emmanuel C. Nsofor	16
Figura 8. Instalación solar de M.H. Mahfuz, M.R. Anisur, M.A. Kibria, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar ...	17
Figura 9. Instalación solar de Sohif Mat, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman .....	18
Figura 10. Sección de un tubo de vacío a) sin PCM b) con PCM en su interior. ....	18
Figura 11. Investigación solar de P. Felinski, R. Sekret .....	19
Figura 12. Instalación de Zakir Khan, Zulfiqar Ahmad Khan .....	20
Figura 13. Relación Entalpía-Temperatura erythritol.....	22
Figura 14. Relación Entalpía- Temperatura parafina RT-82 .....	24
Figura 15. Vistas acumulador con PCM.....	25
Figura 16. Acumulador de energía de calor sensible y latente de S.D. Sharma, Takeshi Iwata .....	26
Figura 17. Secciones del sistema de acumulación de calor sensible y latente Sohif Mat, Abduljalil A. Al- Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammada. ....	26
Figura 18. Tiempos de carga dependiendo de la longitud del sistema aleteado. ....	27
Figura 19. Diseño interior acumulador de calor latente de Zhipei Hu, Angui Li, Ran Gao, Haiguo Yin...	28
Figura 20. Tiempos de fusión según relación entre diámetros de aleta. ....	28
Figura 21. Diseño interior de acumulador de calor latente y sensible de Zakir Khan*, Zulfiqar Ahmad...	29
Figura 22. Tiempos de fusión del PCM.....	29
Figura 23. Esquema instalación actual UPCT .....	30
Figura 24. Vista real instalación actual UPCT .....	31
Figura 25. Formato comercial parafina RT70HC.....	33
Figura 26. Relación entre la Entalpía y temperatura del RT407HC .....	34
Figura 27. Ubicación Edificio ELDI. ....	35
Figura 28. Zona climática de Cartagena, según CTE. ....	35
Figura 29. Irradiación solar sobre plano horizontal colector mensual colector Vitosol 300-TM. ....	36
Figura 30. Volumen en litros, RT70HC .....	37
Figura 31. Absorbedor ThermProtect .....	40
Figura 32. Esquema simplificado instalación solar propuesta UPCT.....	42
Figura 33. Instalación experimental a) Proceso de carga b) Proceso de descarga. ....	44
Figura 34. Disposición colectores solares Vitosol 300-TM.....	45
Figura 35. Sistema de válvulas para cada pareja de colectores solares .....	45
Figura 36. Disposición de los colectores a) Paralelo b) En serie.....	46

Figura 37. Acumuladores de calor latente y sensible con PCM .....	46
Figura 38. Acumulador de calor latente y sensible con PCM.....	48
Figura 39. Secciones en el interior del acumulador.....	48
Figura 40. Colector solar de tubos de vacío modelo Vitosol 300-TM, Viessmann .....	50
Figura 41. Características técnicas Vitosol 300-TM .....	51
Figura 42. Funcionamiento del heat pipe. ....	51
Figura 43. Curva de rendimiento Vitosol 300-TM.....	52
Figura 44. Modelo MKX-1935-1-6, marca SAER .....	54
Figura 45. Características técnicas bomba SAER CMP 76 .....	55
Figura 46. Vaso de expansión .....	55
Figura 47. Intercambiador placas termosoldables Cipriani, 2A14-10 .....	56
Figura 48. Detalle intercambiador de placas termosoldables .....	57
Figura 49. Direcciones de flujo del fluido caliente y frío. ....	57
Figura 50. Enfriadora Carrier 30RA009.....	58
Figura 51. Dimensiones y peso enfriadora 30RA009.....	58
Figura 52. Datos técnicos .....	58
Figura 53. Tubería y accesorios de cobre .....	59
Figura 54. Aislamiento flexible Armaflex.....	59
Figura 55. Válvula de dos vías Sauter VUN025F300. ....	60
Figura 56. Válvula de tres vías Sauter BUN025F300 .....	61
Figura 57. Actuadores y modos de apertura .....	62
Figura 58. Instalación para la caracterización experimental del coeficiente de caudal de válvula dos vías, según la norma UNE-EN: 1267:2012. a) Montaje previo sin válvula b) Montaje con válvula a ensayar.....	63
Figura 59. Instalación para la caracterización experimental del coeficiente de caudal de válvula tres vías, según la norma UNE-EN: 1267:2012. a) Modo divisor a b) Modo control. ....	63
Figura 60. Conexión eléctrica actuador-válvula.....	64
Figura 61. Pérdida de presión en función del caudal para 10V, válvula 2 vías. ....	66
Figura 62. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 5V, válvula 2 vías.....	67
Figura 63. Coeficientes de caudal Kv en función de la tensión aplicada al actuador para válvula 2 vías. .	67
Figura 64. Coeficiente de caudal medio para cada tensión aplicada. ....	68
Figura 65. Válvula de tres vías función divisora. ....	69
Figura 66. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 0V para AB-B, válvula 3 vías divisora. .....	70
Figura 67. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 6,5V para AB-B, válvula 3 vías divisora. .....	71
Figura 68. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 6,5V para AB-A, válvula 3 vías divisora. .....	71
Figura 69. Comparativa pérdidas salida A y B, tensión 6,5V para válvula 3 vías divisora.....	72

Figura 70. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 10V para AB-A, válvula 3 vías divisora.	73
Figura 71. Coeficiente de caudal <b>kvA</b> según tensión aplicada.	74
Figura 72. Coeficiente de caudal <b>kvA</b> según tensión aplicada.	74
Figura 73. Configuración en función de control.	75
Figura 74 Pérdida de presión en función del caudal para tensión 10V para A-AB válvula 3 vías control.	76
Figura 75. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 5V para A-AB válvula 3 vías control.	77
Figura 76. Pérdida de presión en función del caudal para tensión 5V para B-AB válvula 3 vías control.	77
Figura 77. Pérdidas para tensión 0V B-AB V válvula 3 vías control.	78
Figura 78. Coeficiente de caudal <b>kvA</b> según tensión aplicada	79
Figura 79. Coeficiente de caudal <b>kvB</b> según tensión aplicada	79
Figura 80. Tramos de tubería para el proceso de carga en función del caudal.	81
Figura 81. Tramos de tubería para el proceso de descarga en función del caudal.	82
Figura 82. Punto de funcionamiento de la bomba SAER MKX-1395-1-6.	86
Figura 83. Punto de funcionamiento bomba SAER CMP-76.	88
Figura 84. Condiciones de funcionamiento en PF, SAER CMP-76.	89
Figura 85. Coriolis ROTAMASS PRIME 25	90
Figura 86. Caudalímetros entrada acumuladores.	90
Figura 87. CIEMAT modelo SMP 10.	91
Figura 88. Sondas de temperatura PT-100.	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de instalaciones solares térmicas	7
Tabla 2. Tipos de PCM	10
Tabla 3. Ventajas e inconvenientes PCM inorgánicos	11
Tabla 4. Ventajas e inconvenientes PCM orgánicos	11
Tabla 5. Ventajas e inconvenientes PCM eutécticos	12
Tabla 6. Propiedades Termo-Físicas erythritol	22
Tabla 7. Propiedades Termo- Físicas parafina RT44HC	23
Tabla 8. Propiedades Termo-Físicas parafina RT-82	23
Tabla 9. Propiedades Termo-Físicas PCM Biodegradable	24
Tabla 11. Irradiación diaria absorbida por un colector Vitosol 300-TM.	36
Tabla 12. Volumen de PCM que se puede fundir durante un día.	37
Tabla 13. Caudales de carga instalación dependiendo del número de colectores activos.	39
Tabla 14. Caudal para proceso de descarga según acumuladores en uso.	40
Tabla 15. Tabla de resultados a tensión 10 V, válvula 2 vías.	66
Tabla 16. Tabla de resultados tensión 5V, válvula 2 vías.	66
Tabla 17. Coeficientes de caudal medio	68
Tabla 18. Tabla de resultados para tensión 0V, válvula 3 vías divisora	69
Tabla 19. Tabla de resultados tensión 6,5V, válvula 3 vías divisora.	70

Tabla 20. Tabla de resultados para tensión 10V, válvula 3 vías divisora .....	72
Tabla 22. Tabla de resultados para tensión 5V válvula 3 vías control.....	76
Tabla 23. Resultados obtenidos para la tensión 0V válvula 3 vías control.....	77
Tabla 24. Datos para el proceso de carga. ....	81
Tabla 25. Datos para el proceso de descarga.....	82

## NOMENCLATURA

- ACS, Agua Caliente Sanitaria.
- CTE: Código Técnico de la Edificación.
- LHS, Almacenamiento de calor latente.
- PCM, Material de Cambio de Fase.
- TES, Almacenamiento de Energía Térmica.
- D, diámetro de la tubería de cobre (mm).
- $I$ , Irradiación media ( $W/ m^2$ ).
- $K$ : coeficiente adimensional de pérdidas de un accesorio.
- $K_v$ , coeficiente de caudal ( $m^3/h - bar$ ).
- $K_1$ , coeficiente de pérdidas del colector.
- $K_2$ , coeficiente de pérdidas del colector.
- $L$ : longitud total de las tuberías (m).
- $Q$ , caudal de trabajo circuito primario ( $m^3/h$ ).
- $q$ , caudal de trabajo circuito secundario( $m^3/h$ ).
- $T^*$ , Temperatura reducida (K).
- $T_{fluido}$ , temperatura del fluido(K).
- $T_{amb}$ , temperatura ambiente (K).
- $U$ , velocidad media del agua (m/s).
- $\Delta p_t$ , pérdida de carga en la tubería (Pa).
- $\Delta p_v$ , pérdida de carga en la propia válvula, (Pa).
- $\Delta p_{v+t}$ , la pérdida de carga en la propia válvula y del tramo recto de tubería, (Pa).
- $\xi$ , coeficiente de resistencia de flujo.
- $\eta_o$ , rendimiento óptico del colector.
- $\lambda_D$ : coeficiente de rozamiento.
- $\rho$ , la densidad del agua, ( $kg/ m^3$ )
- $\rho_0$  la densidad del agua a la temperatura de referencia de 15°C.

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes y justificación del proyecto.

El primer despegue del mercado para instalaciones de energía solar térmica, se puede situar a principios de los años 80. Después de una pequeña evolución positiva, el mercado quedó estancado a un nivel muy bajo. Básicamente por el descenso de los precios de la energía, así como de la poca fiabilidad de las instalaciones. La escasa fiabilidad de los sistemas de primera generación fue debida a la falta de conocimiento y experiencia, más que a la falta de calidad de los materiales.

Hoy en día, las energías renovables y sus diversas aplicaciones están en constante cambio, y en los últimos años ha dado grandes avances en su desarrollo. Las energías renovables o verdes, se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la gran cantidad de energía que contienen, o por el hecho de que son capaces de regenerarse por medio naturales. Son cada vez más necesarias y más útiles. Un mundo y una economía basada en energías renovables es la clave para hacerse hueco en mercados energéticos y ganar en competitividad. La inversión, aunque costosa inicialmente, puede ayudarnos a ganar la lucha contra el cambio climático con el paso de los años.

Una de las diversas aplicaciones es la energía solar térmica. Consiste principalmente, en el aprovechamiento de la energía procedente del Sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua o aire. En aplicaciones de baja temperatura, como pueden ser las de uso doméstico, se destina para Agua caliente Sanitaria (ACS).

En la actualidad, la mayoría de sistemas solares térmicos cuentan con tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria (ACS) de dimensiones considerables. Esto es debido a que tienen que almacenar agua para las horas de radiación solar mínima o nula, en donde la instalación deja de ser operativa que ya necesita una energía mínima para su correcto funcionamiento.

Esto nos lleva también a otra de sus desventajas, la operatividad debido a su dependencia de una fuente de energía para que se produzca la acumulación de energía para su posterior intercambio con el fluido caloportador. En horas donde la energía no es suficiente, como puede ser en la noche, la instalación deja de funcionar y el intercambio de energía con el fluido calor portador deja de existir. Es por todo lo anterior, que se necesita el uso de tanques de dimensiones considerables, haciendo que se eleve el coste y peso de la instalación final.

En la actualidad, se están estudiando diversas formas de almacenamiento térmico para este tipo de sistemas solares de baja temperatura para disminuir el volumen del tanque de almacenamiento de ACS y también, disminuir las pérdidas de energía que se producen (debido a la variación de temperaturas de la masa acumuladora).

El almacenamiento de la energía térmica (TES, Thermal Energy Storage) procedente de la radiación solar es, actualmente, una tecnología en desarrollo, que permite la mejora de las prestaciones de los sistemas solares térmicos. El uso de sistemas de almacenamiento de energía en aplicaciones de baja temperatura, como las utilizadas en edificios o sector servicios, permite ajustar la generación durante los periodos intermitentes en los que se dispone de radiación solar, a la curva de demanda variable de los usuarios. Así, una óptima combinación de sistemas de generación solar térmica basados en colectores solares, y sistemas de almacenamiento de energía utilizando PCM (Phase Change Material), permite una reducción de los costes de operación, y de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Entre los materiales utilizados para almacenamiento de energía, los PCM constituyen una alternativa que permite explotar la capacidad de almacenamiento en forma de calor latente, mucho mayor que en forma de calor sensible. Uno de los aspectos a estudiar es la capacidad de carga y descarga de energía de estos materiales de cambio de fase. El periodo de carga (fusión del PCM) está limitado, dependiendo de: la radiación solar disponible (que depende de la época del año y de las condiciones climáticas), las propiedades termo-físicas del PCM y del fluido caloportador, generalmente agua o aire, así como, de la conductividad térmica del material que constituye el intercambiador. Por otro lado, el proceso de descarga de la energía acumulada (solidificación del PCM), debe producirse de tal manera que se permita disponer de energía térmica en los periodos en los que no existe radiación solar y aprovechando al máximo la energía en forma de calor latente almacenada, produciendo la solidificación completa de los PCMs.

El Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos dispone en la actualidad de un banco de ensayo de captadores solares térmicos “side-by-side” exterior, que permite la caracterización experimental de dichos elementos en condiciones reales de operación, así como, la evaluación de mejoras implementadas con objeto de optimizar su eficiencia térmica.

La utilización de materiales de cambio de fase como elemento de almacenamiento de energía, exige disponer de un determinado gasto másico de fluido caloportador a temperaturas superiores a las que se pueden alcanzar utilizando captadores solares

térmicos, por lo que en este Trabajo Fin de Grado se plantea la necesidad de modificar, en mayor o menor medida, la instalación disponible, para poder evaluar la viabilidad de utilizar PCMs.

La instalación a desarrollar debe ser flexible y modular, de manera que se disponga de un rango de gastos máxicos, y temperaturas de fluido caloportador adecuados, para poder caracterizar el proceso de carga y descarga de energía de los diferentes PCMs, así como, optimizar así el volumen de PCM que debe contener el intercambiador.

## **1.2 Objetivos del TFG**

En este Trabajo Fin de Grado se plantea el diseño de una instalación experimental de carácter flexible y modular, que permita caracterizar experimentalmente nuevos sistemas de acumulación de energía solar basados en el almacenamiento de calor sensible, y latente, utilizando materiales de cambio de fase, como medio de almacenamiento de dicha energía.

El trabajo incluye realizar una revisión bibliográfica en relación con el diseño de instalaciones experimentales para el estudio de los sistemas de almacenamiento de energía solar utilizando PCM, analizar la instalación existente, y proponer las modificaciones necesarias para adaptarla al nuevo objetivo, diseñar la configuración de la nueva instalación a construir, teniendo en cuenta su carácter flexible y modular, y seleccionar los componentes hidráulicos de dicha instalación: elemento/s de captación de energía solar, grupo de bombeo, elementos de regulación y control, elementos de almacenamiento de energía, e instrumentación.

Una vez validado el diseño y la configuración del sistema, se procederá a la especificación técnica de todos los componentes, así como, al cálculo hidráulico del grupo de bombeo necesario para conseguir los caudales de operación adecuados. Para un mejor dimensionado del grupo de bombeo se procederá a caracterizar experimentalmente los componentes del sistema de los que no se disponga información fiable del fabricante. Así, por ejemplo, se deberá proceder al ensayo, según norma, de las válvulas de regulación y control del sistema, ya que al tener que operar con diferentes grados de apertura, será preciso conocer su coeficiente de pérdidas en función de la tensión de alimentación.

Finalmente, una vez seleccionados todos los componentes, se deberá supervisar el montaje, y la puesta en marcha de la instalación, y de la instrumentación básica de esta, con objeto de verificar que se adecua a los objetivos planteados.

### **1.3 Fases del TFG**

El Trabajo Fin de Grado se divide en las siguientes fases principales:

1) Revisión bibliográfica. Consistirá en analizar las características de otras instalaciones similares, así como, los PCMs utilizados por otros investigadores.

2) Análisis de la instalación actual, definición del rango de gastos máxicos y temperaturas de operación, para la caracterización experimental de sistemas de almacenamiento térmico, utilizando materiales de cambio de fase.

3) Propuesta de modificación de la instalación actual, y justificación del nuevo diseño/configuración de la instalación de ensayos.

4) Especificación técnica de los componentes de la instalación propuesta, y cálculo hidráulico del grupo de bombeo. Caracterización experimental previa de componentes, si fuese necesario.

5) Especificación de la instrumentación básica de la nueva instalación. Estudio de la instrumentación de la instalación actual disponible.

6) Supervisión del montaje de la instalación.

7) Puesta en marcha de la instalación. Realización de las pruebas preliminares necesarias para comprobar que se cumplen los requerimientos de diseño, y la adecuación de la instrumentación.

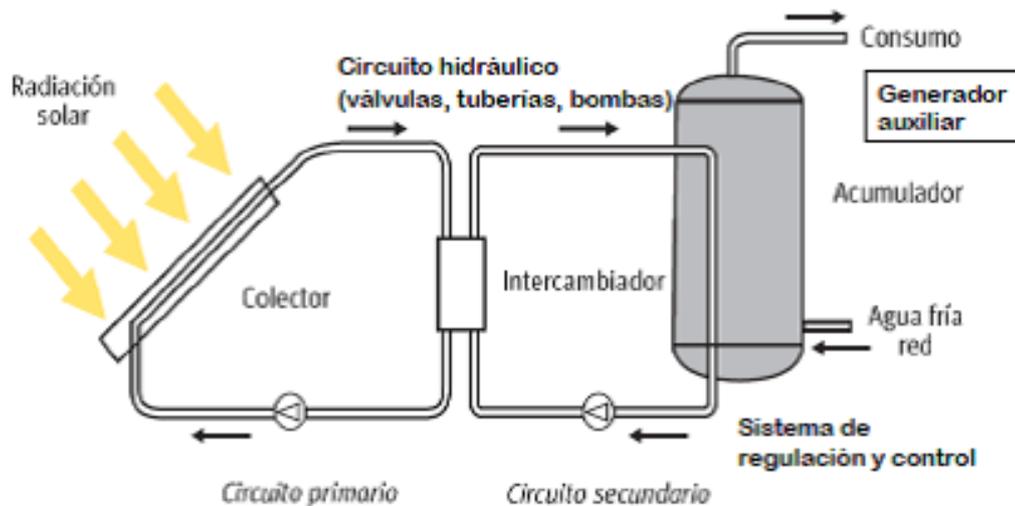
8) Redacción de la memoria del TFG. Consistirá en redactar un documento en el que se resuman las tareas realizadas, se describa en detalle la solución propuesta y su justificación.

## **Capítulo 2. Sistemas solares térmicos de baja temperatura.**

Se va a desarrollar una instalación experimental solar térmica de baja temperatura, por ello, es importante definir las principales características de este tipo de sistemas, mostrando interés en las características principales de equipos e instrumentación.

### **2.1 Fundamentos de las instalaciones solares térmicas de baja temperatura**

El principio elemental en el que se fundamenta cualquier instalación solar térmica es el de aprovechar la energía del Sol mediante un conjunto de captadores y, transferirla a un sistema de almacenamiento que abastece el consumo cuando sea necesario.



**Figura 1.** Esquema básico instalación solar de baja temperatura.

Se muestra en Figura 1, un esquema básico de una instalación solar térmica, distinguiéndose en él los siguientes circuitos:

- **Circuito primario:** circuito formado por los captadores y las tuberías que los unen, en el que el fluido de trabajo recoge la energía térmica producida en los captadores y la transfiere al circuito secundario a través de un intercambiador de calor.
- **Circuito secundario:** circuito en el que se recoge la energía captada del circuito primario y se transfiere al circuito de consumo.
- **Circuito de consumo:** circuito que parte de la red de distribución de los sistemas de abastecimiento y llega a los puntos de consumo. Este circuito transporta agua potable de consumo.

Desde un punto de vista funcional, una instalación solar térmica consta de los siguientes sistemas fundamentales:

- **Sistema de Captación:** transforma la radiación solar incidente en energía térmica, calentando el fluido de trabajo que circula a través de este sistema.
- **Sistema de intercambio:** realiza la transferencia de energía térmica entre el fluido de trabajo y el agua que circula por el circuito secundario.
- **Sistema de acumulación:** almacena el agua caliente hasta su posterior uso
- **Sistema hidráulico:** transporta el fluido por toda la instalación
- **Sistemas de regulación y control:** asegura el correcto funcionamiento de la instalación solar.

- **Generador auxiliar:** complementa el aporte solar suministrando la energía necesaria para cubrir la demanda prevista y, por tanto, asegura la dotación de ACS.

Los elementos principales de la instalación están conectados mediante los circuitos hidráulicos, primario o solar, y secundario. Además del conjunto de tuberías deben disponerse otra serie de elementos como: las bombas para forzar la circulación tanto del fluido primario como del agua de consumo, válvulas con diferentes funciones, sistemas de purga, vaso de expansión, caudalímetros, etc.

La instalación solar térmica es un sistema en el que el factor de entrada principal, esto es, la radiación solar, es variable y aleatoria. El consumo de agua es también variable en la mayor parte de las aplicaciones. Asimismo, las necesidades de temperatura dependen del tipo de aplicación.

En todo caso, debido a las propias características del recurso solar, unido a la variabilidad del consumo, se hace necesario incluir un sistema generador auxiliar que permita garantizar un suministro de agua suficiente y a la temperatura requerida.

## 2.2 Clasificación de las instalaciones solares térmicas.

Existe una amplia variedad de configuraciones en las instalaciones solares térmicas para suministro de Agua Caliente Sanitaria. Se pueden establecer diferentes criterios de clasificación, atendiendo a las características e integración de los equipos que lo constituyen. Se resumen en la Tabla 1, los distintos tipos de instalación para mostrar la gran variedad de instalaciones que hay de este tipo atendiendo a diferentes criterios.

<b>Principio de circulación</b>	Circulación natural o termosifón
	Circulación forzada mediante bombeo
<b>Sistema de intercambio</b>	Sistemas directos
	Sistemas indirectos en doble circuito
<b>Integración de los componentes</b>	Integrado, con captador y depósito en el mismo componente
	Compacto, con captador y depósitos montados en una unidad

	Partido, con captador y depósito separados
<b>Sistema de energía auxiliar</b>	Instantáneo o en línea
	En depósito de acumulación secundario
	En depósito de acumulación solar
<b>Grado de distribución en edificios multifamiliares (captación centralizada)</b>	Acumulación centralizada, sistema auxiliar centralizado
	Acumulación centralizada, sistema auxiliar distribuido
	Acumulación distribuida, sistema auxiliar distribuido

**Tabla 1.** Tipos de instalaciones solares térmicas

Dentro de esta clasificación, los dos criterios más importantes son:

1. Principio de circulación
2. Sistema de transferencia de calor

El primero, se refiere al mecanismo mediante el cual se produce el movimiento, si es natural mediante la variación de densidad  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) del fluido calor-transportador o si lo hace impulsado a través de un sistema de bombeo. Mientras que el segundo criterio se basa en una transferencia directa de calor al fluido de trabajo o bien una transferencia utilizando un equipo de intercambio de calor.

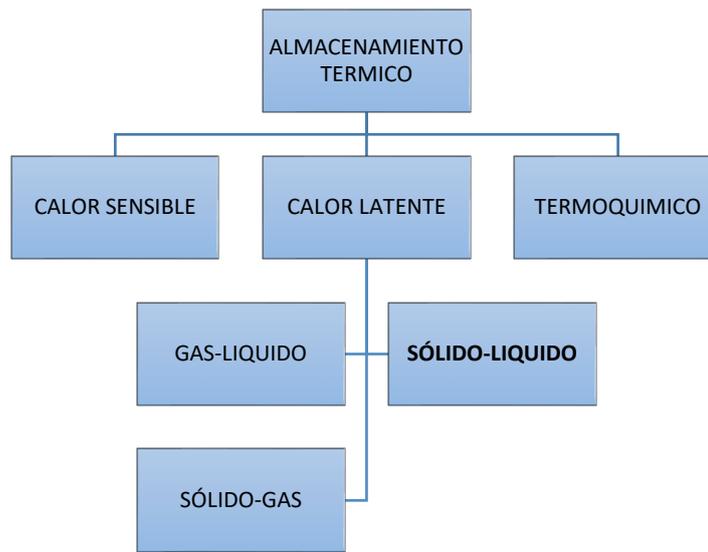
### **Capítulo 3. Almacenamiento de energía. Materiales de cambio de fase.**

El almacenamiento de energía térmica se podrá definir como una “restricción de flujo” de la energía, confinándola en algún tipo de dispositivo de almacenamiento por un periodo determinado de tiempo. La razón de ser de la conservación de la energía, es la oportunidad de utilizarla en un momento posterior de necesidad.

La energía térmica proveniente de fuentes naturales, no siempre está disponible cuando se necesita. El almacenamiento, permite superar la falta de energía térmica en momentos en los cuales la fuente natural carece de suficiente energía para satisfacer las necesidades los dichos momentos. Se encuentra una justificación en que este proceso de

almacenamiento reduce el consumo de energía y la reducción de CO<sub>2</sub>, asociadas al consumo. A los posibles beneficios, energéticos y ambientales, se deben añadir los económicos. Es por lo anterior, que se estudian sustancias para favorecen al almacenamiento de energía.

Existen sustancias que almacenan gran cantidad de energía al cambio de estado, sobre todo de sólido a líquido, o viceversa, lo que se conoce como almacenamiento térmico por calor latente



**Figura 2.** Almacenamiento térmico de energía.

El calor latente es la cantidad de energía que se necesita ser absorbida o liberada cuando un material cambia de estado. Los materiales con capacidad de almacenamiento de energía térmica por calor latente son denominados materiales de cambio de fase, y conocidos como PCM (Phase Change Materials). Son sustancias con un calor de fusión alto, el cual, fundiéndose y solidificándose a una temperatura concreta, es capaz de almacenar y liberar grandes cantidades de energía. Por ello, los PCMs son clasificados como unidades de almacenamiento de calor latente (latent heat storage units o LHS).

El cambio de estado es un proceso endotérmico, se produce con absorción de calor. En el caso del cambio de estado de sólido a líquido, cuando se alcanza la temperatura de fusión, el material comienza su proceso de cambio de estado y almacenamiento de energía por calor latente. Su temperatura permanece prácticamente constante hasta que se completa el proceso de fusión.

Los ciclos de cambios de estado son reversibles, y la energía térmica se absorbe o se libera cuando a la temperatura a la cual está sometida el material es mayor o menor que su

temperatura de cambio de fase. En la Figura 3, se muestra el comportamiento típico de un PCM con cambios solido-liquido, relacionando el almacenamiento de energía con los cambios de temperatura.



Figura 3. Relación almacenamiento energía- temperatura

### 3.1 Clasificación de los PCM.

En la actualidad numerosas sustancias y mezclas de ellas se han investigado para su posible uso como PCM en TES. Cada material se puede incluir dentro de un rango de temperaturas de operación:

- **Baja temperatura**, por debajo de los 15°C utilizadas normalmente en sistemas de aire acondicionado y en la industria alimenticia.
- **Media temperatura**, entre 15-90°C utilizadas fundamentalmente en aplicaciones de ahorro de energía térmica a nivel doméstico, en el diseño de edificios, o en aplicaciones solares, textiles y electrónicas.
- **Alta temperatura**, por encima de 90°C desarrolladas principalmente para aplicaciones aeroespaciales e industriales.

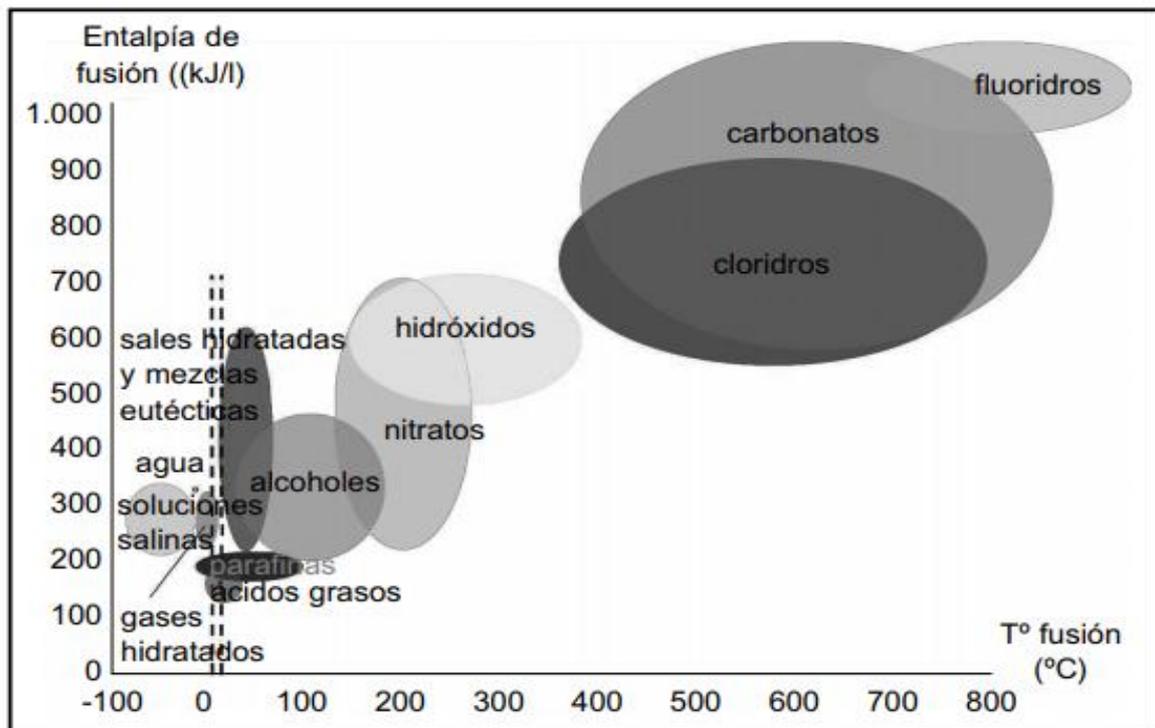
La principal clasificación de los PCM puede realizarse según la naturaleza de los materiales.

Tipo de PCM	
Orgánicos	Compuestos de Parafina
	Compuestos sin Parafina
Inorgánicos	Sales hidratadas
	Metálicos
Eutécticos	Orgánico-Orgánico

	Orgánico-Inorgánico
	Inorgánico-Inorgánico

**Tabla 2.** Tipos de PCM

En la Figura 4, podemos ver la clasificación de PCM según su temperatura y entalpía de fusión, clasificándolos en diferentes grupos.



**Figura 4.** Materiales de Cambio de Fase según su entalpía y temperatura de fusión.

### 3.1.1 PCM inorgánicos

Los PCM inorgánicos incluyen las soluciones de sales en agua y las sales hidratadas. Estos materiales son más baratos que los orgánicos, no presentan problemas de inflamabilidad y suelen tener calores latentes por unidad de volumen superiores, aunque por unidad de masa son parecidos. Sin embargo, sí que sufren el problema de la sobrefusión y de la separación de fases, aunque ambos tienen solución, por lo que su mayor inconveniente pasa a ser la corrosión que provocan en determinados metales. Para solucionar la sobrefusión se mezcla el PCM con nucleadores, sustancias que favorecen la nucleación. Para evitar la separación de fases se recurre a mezclas eutécticas, que son mezclas de dos o más componentes en las que todos ellos solidifican fuera del líquido a la mínima temperatura. Otra posibilidad es añadir sustancias que incrementen la viscosidad del material, consiguiendo así que las fases queden juntas.

PCM inorgánicos	
Ventajas	Inconvenientes
Generalmente baratos	Uso problemático
Densidad de almacenamiento térmico elevada	Uso con aditivos
Elevada conductividad térmica	Subenfriamiento
Temperatura de cambio de fase definida	Aditivos reducen la capacidad de almacenamiento latente
No inflamables	Corrosivos

**Tabla 3.** Ventajas e inconvenientes PCM inorgánicos

### 3.1.2 PCM orgánicos

Los PCM orgánicos son principalmente las parafinas, los ácidos grasos y los azúcares alcoholes, también llamados polialcoholes; y en menor medida los polietilenglicoles. Sus principales ventajas son no ser corrosivos, ni tóxicos, ni presentar problemas de subfusión, así como su buena estabilidad cíclica. Por el contrario, su conductividad térmica suele ser baja y son materiales inflamables.

PCM orgánicos	
Ventajas	Inconvenientes
Uso fácil y sencillo	Calor latente y entalpia baja
Estabilidad térmica y química	Baja conductividad térmica
Sin subenfriamiento	Amplio rango de fusión
No corrosivo	Inflamables
Reciclajes y ecológicos	Coste elevado

**Tabla 4.** Ventajas e inconvenientes PCM orgánicos

### 3.1.3 Eutécticos y mezclas de PCM.

El objetivo de las mezclas de sustancias es obtener un producto que supere las prestaciones de las sustancias individuales o superar las debilidades o inconvenientes de estas.

Un eutéctico es una mezcla de dos o más componentes, cada uno de los cuales se funde y solidifica de manera congruentemente. Un eutéctico tiene una alta estabilidad en estado líquido, sus componentes se funden simultáneamente.

Además, tienen una capacidad de almacenamiento de energía térmica mayor que los compuesto orgánicos e inorgánicos. Tienen una gran durabilidad y son fáciles de impregnar en materiales porosos.

PCM eutécticos	
Ventajas	Inconvenientes
Punto de fusión bueno	Usos prematuros
Densidad de almacenamiento alta	

**Tabla 5.** Ventajas e inconvenientes PCM eutécticos

### 3.2 Propiedades de los Materiales de Cambio de Fase (PCM)

Los materiales con cambio de fase (PCM) poseen la capacidad de almacenamiento de calor latente y sensible, sobre todo el primero. Las principales características a cumplir por un PCM para almacenamiento energético son:

#### 3.2.1 Propiedades Físicas

- La densidad del líquido y del sólido deben ser similares, y preferiblemente de un valor elevado, para que el PCM pueda almacenar mayor cantidad de calor por unidad de volumen.
- Variación de volumen, en el cambio de fase, baja.
- Alta densidad.
- Una baja presión de vapor a la temperatura operativa.
- Mezcla congruente de los distintos materiales que puedan formar el PCM.

#### 3.2.2 Propiedades Cinéticas

- Evitar el problema de histéresis, subenfriamiento o retardo al inicio de la solidificación, como ocurre en los PCM inorgánicos, que se produce al no ceder el calor latente de un PCM pese a que su temperatura sea inferior al punto de congelación.
- Poseer suficiente tasa de cristalización: en los PCM inorgánicos se necesita agentes nucleadores aditivos para que comience a solidificar la sustancia.
- Un alto ratio de nucleación.

#### 3.2.3 Propiedades Químicas

- Proceso de cambio de fase debe ser reversible, y solo depender de la temperatura.
- Estables, para evitar su descomposición y contaminación.
- No presentar segregación de fases.

- Ser compatibles con los materiales encapsulados.
- Debería ser no tóxico, ignífugo y no explosivo, para asegurar la seguridad.

### **3.2.4 Propiedades Térmicas**

- La temperatura de fase de cambio de fase adecuada para cada aplicación
- Presentar una temperatura de fusión definida.
- Elevado calor latente por unidad de volumen.
- Poseer una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible (calor específico) en estado sólido y líquido y elevada entalpía de cambio de fase, calor latente.
- Alta conductividad térmica en ambas fases.

## **Capítulo 4. Revisión bibliográfica**

### **4.1 Introducción.**

El almacenamiento de energía en instalaciones solares térmicas es uno de los puntos débiles de este tipo de sistemas. La mayoría cuentan con tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria (ACS) de dimensiones considerables. Esto es debido a que tienen que almacenar agua para las horas en donde la radiación solar es mínima o nula, en donde la instalación deja de ser operativa que ya necesita una energía mínima para su correcto funcionamiento.

En la actualidad, se está estudiando en diversas formas de almacenamiento térmico para este tipo de sistemas solares de baja temperatura para disminuir el volumen del tanque de almacenamiento de ACS y también, disminuir las pérdidas de energía que se producen (debido a la variación de temperaturas de la masa acumuladora).

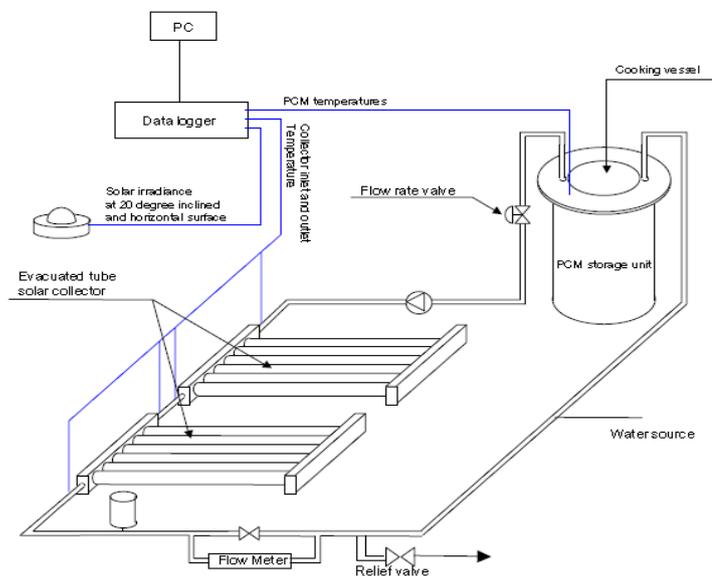
Uno de los objetivos principales de este Trabajo de Fin de Grado, es la revisión bibliográfica de diversos artículos relacionados con la instalación a desarrollar. Se basará, en analizar los montajes experimentales realizados con anterioridad por diversos investigadores en busca de pautas en los parámetros de diseño. Describiremos los equipos que componen las instalaciones, explicando el proceso que se lleva en cada una y enunciando sus características más importantes.

### **4.2 Revisión bibliográfica**

Se presentan los antecedentes, y el estado actual, de las investigaciones y el desarrollo que se ha dado en las aplicaciones relacionadas con instalaciones solares térmicas con sistemas de acumulación de energía utilizando Materiales de Cambio de Fase.

La primera configuración ha estudio es la que expone *S.D. Sharma, T. Iwata, H. Kitano, K. Sagara, 2005* [1]. Es un prototipo de cocina solar utilizando un sistema de almacenamiento de energía con PCM. Sus componentes principales son: dos colectores solares de tubo de vacío, grupo de bombeo y una unidad de almacenamiento de calor sensible compuesta con PCM (Phase Change Material) como muestra la Figura 5.

La bomba impulsa el agua hacia los colectores solares. Éstos, aumentan la temperatura del fluido gracias a la energía absorbida del sol. El rango de temperaturas de salida del fluido calor-transportador es de 80-120°C, adecuado para la fusión del material de cambio de fase. Esta temperatura se consigue gracias a la disposición en serie de los colectores, logrando un aumento de temperatura en el menor tiempo posible.



**Figura 5.** Instalación solar S.D. Sharma, T. Iwata, H. Kitano, K. Sagara

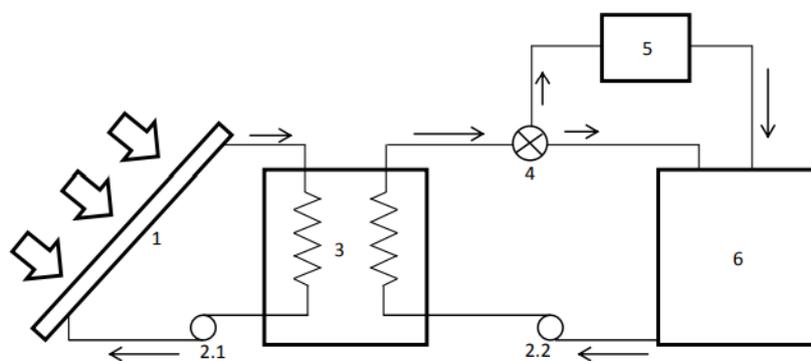
Tras ello, el fluido calor-transportador llega a la unidad de almacenamiento de energía (TES, Storage Energy System) donde se produce el intercambio de energía. Se basa en un cilindro concéntrico bien aislado en su exterior, en donde el fluido calor-transportador pasa por el cilindro interior, transfiriendo energía en forma de calor al PCM que se encuentra en el cilindro exterior.

El Material de Cambio de Fase elegido es el erythritol, PCM adecuado para este tipo de aplicaciones. Durante el periodo de carga, el fluido calor-transportador cede su energía al PCM produciendo el cambio de fase del material, almacenando la energía en forma de calor latente. La carga del PCM dura hasta que toda la cantidad del material que hay en el interior del acumulador haya cambiado de fase. Este calor almacenado, se utiliza para calentar en

las horas en las que los colectores solares no pueden captar la suficiente energía denominado, periodo de descarga.

El PCM alcanza temperaturas superiores al punto de fusión del PCM en verano, pudiendo utilizar la energía durante varias veces al día. Pero también, en época invernal parte de los PCM no se llegó a fundir al llegar a temperaturas por debajo de la temperatura de fusión.

*Oluwaseun S. Alajo, Victor C. Ibekwe, Emmanuel C. Nsofor, 2013 [4]*, investigan el rendimiento de las instalaciones solares térmicas con PCM biodegradables. Se desarrolla un sistema de almacenamiento de energía solar (Figura 6) basado en un material de cambio de fase (PCM), no contaminante, no inflamable, renovable y biodegradable, a base de vegetales.



**Figura 6.** Esquema instalación solar investigación de Oluwaseun S. Alajo, Victor C. Ibekwe, Emmanuel C. Nsofor

El sistema consiste en un colector solar (1) que transfiere energía al fluido, que circula gracias al sistema de bombeo (2.1). El fluido calor-transportador llega al tanque de almacenamiento lleno de PCM (3), donde intercambia energía al PCM, almacenando esta energía en forma de calor latente. La bomba del circuito secundario (2.2) hace circular agua a través de un intercambiador de calor secundario también encerrado en el tanque PCM para recuperar energía. Los resultados mostraron que la mitad de la energía almacenada por el colector es captada por el sistema de almacenamiento de energía con PCM, y su rendimiento se mantenía constante durante toda la época del año a pesar de las pérdidas de calor del sistema. Además, se vio que dependiendo del flujo del fluido calor-transportador la eficiencia de la instalación es mayor, siendo un caudal óptimo el que mejores resultados tenga durante el almacenamiento de calor y la recuperación de calor.

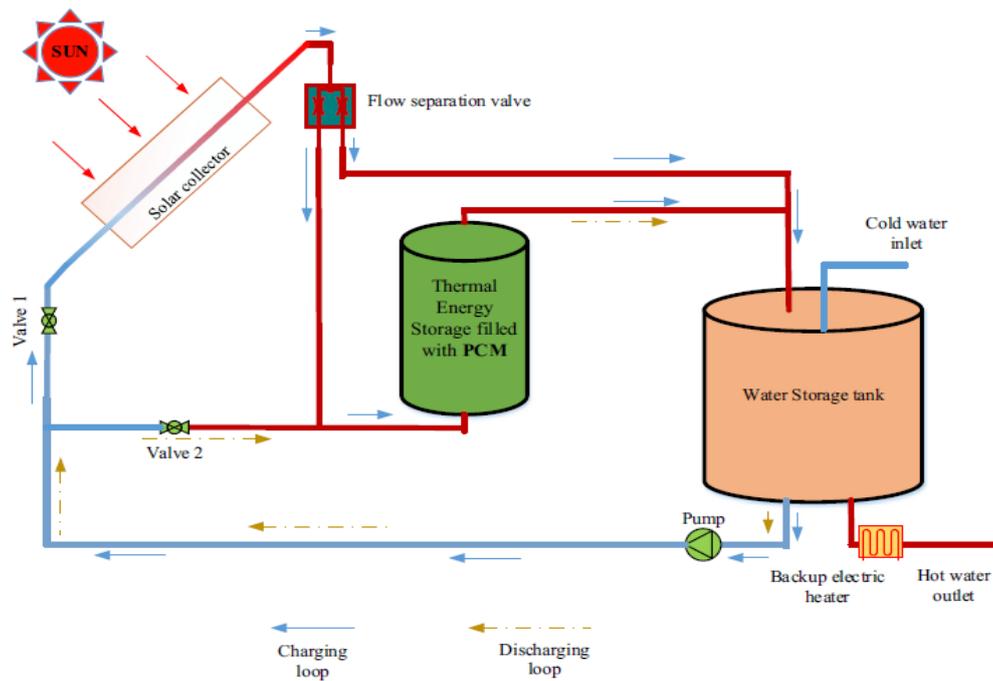


**Figura 7.** Instalación solar investigación Oluwaseun S. Alajo, Victor C. Ibekwe, Emmanuel C. Nsofor

*M.H. Mahfuz, M.R. Anisur, M.A. Kibria, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar, 2014 [6]* desarrollan una instalación similar a la anterior descrita Figura 6, para el estudio del sistema de carga y descarga en sistemas de acumulación térmica de calor sensible y latente utilizando PCM.

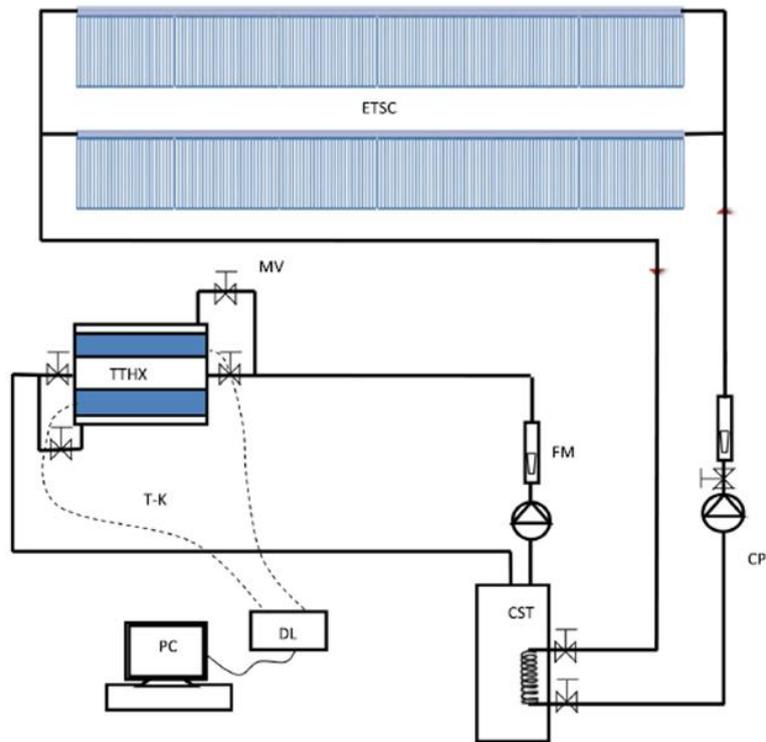
Dispone de un sistema de válvulas que permite direccionar el flujo según el proceso que se lleve a cabo, ya sea carga o descarga. Durante el periodo de carga, el sistema de válvulas hace que el fluido pase por los colectores solares. Tras su paso, aumenta su temperatura gracias al proceso de transmisión de calor que se produce en los equipos anteriores. El fluido calor-transportador se divide en dos sentidos, se destinan al depósito de acumulación y sistema de almacenamiento térmico (Figura 8). En este último, el fluido transfiere su energía al PCM, comenzando el proceso de cambio de fase. El proceso de carga finaliza cuando la totalidad del PCM se ha fundido. Se analizan diversos caudales en busca del resultado con un rendimiento superior a los demás, para encontrar el caudal óptimo para la instalación.

La descarga del ciclo comienza cuando la temperatura del fluido está por debajo de la temperatura de consigna, fijada para la instalación. El sistema impide el paso del fluido por el colector solar, dirigiendo la totalidad del caudal directamente al sistema de acumulación de energía térmica. En él, el PCM en su totalidad fundido, transfiere su energía al fluido que poco a poco aumenta su temperatura, acumulándolo después en el depósito. Sistemas auxiliares ayudan a mantener constante la temperatura de salida del fluido hacia el fin de la instalación. los resultados muestran que la descarga se produce a una temperatura inferior a la de carga, teniendo una pérdida de la energía que se ha transferido.



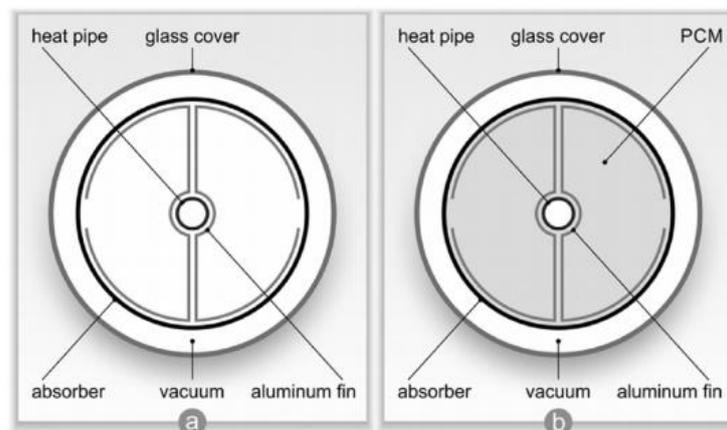
**Figura 8.** Instalación solar de M.H. Mahfuz, M.R. Anisur, M.A. Kibria, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar.

Otro tipo de configuración se muestra en *Sohif Mat*, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammada, 2014 [5], para el estudio del proceso de carga en PCM. Como en la primera instalación descrita, utiliza colectores solares de tubo de vacío, más eficiente que los de colectores planos. Como se ve en la Figura 9, se distinguen dos circuitos con sus correspondientes grupos de bombeo. El primero, compuesto principalmente por el sistema de colectores solares, calientan el fluido calor-transportador a temperaturas por encima del punto de fusión del PCM utilizado, que en este caso es parafina RT-82. Una vez que alcanza una temperatura óptima, este intercambia energía con el fluido que está dentro del tanque de almacenamiento (CST). Una vez que el este fluido se encuentra a una temperatura fijada en la instalación, se impulsa hacia el intercambiador de calor con PCM (proceso de carga). Una novedad introducida es la disposición de aletas dentro del intercambiador de calor, añadido que instalaciones anteriormente descritas no tienen. Reducen el tiempo de cambio de fase considerablemente, amentando la eficiencia del proceso.



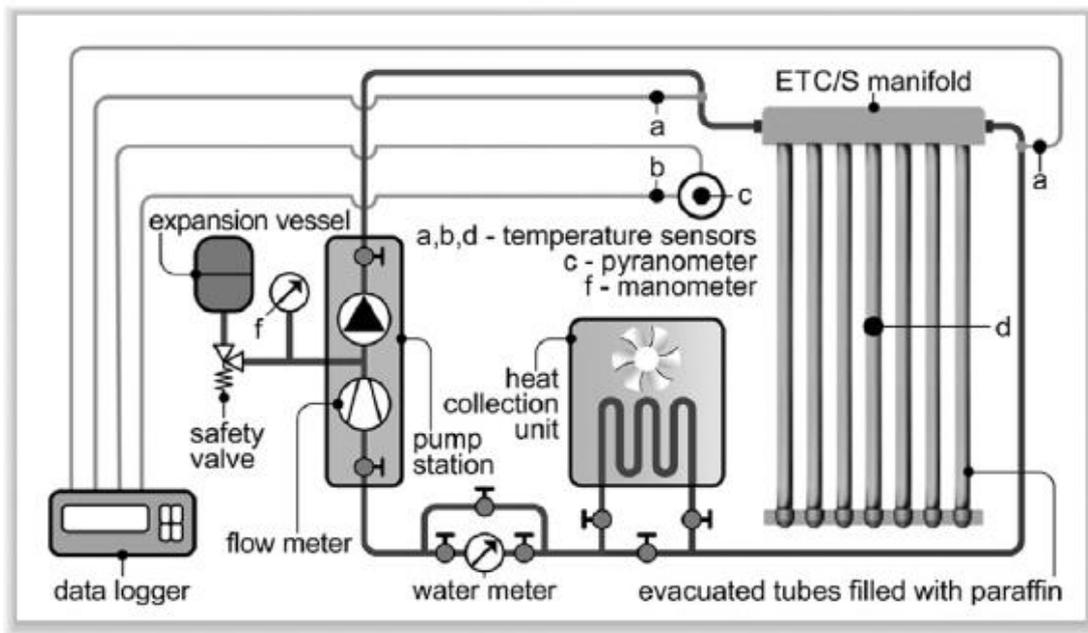
**Figura 9.** Instalación solar de Sohif Mat, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammada

*P. Felinski, R. Sekret, [10]* estudia una nueva versión de sistemas de acumulación de energía latente. Investigan el concepto de sistema acumulador/colector de tubos de vacío que contiene PCM (parafina) en su interior (Figura 10). Básicamente la instalación experimental (Figura 11) consta de un colector de tubos de vacío, cuya eficiencia es mayor que los colectores planos, intercambiador de calor, vaso de expansión y un grupo de bombeo, además de toda la instrumentación necesaria para el desarrollo de su investigación.



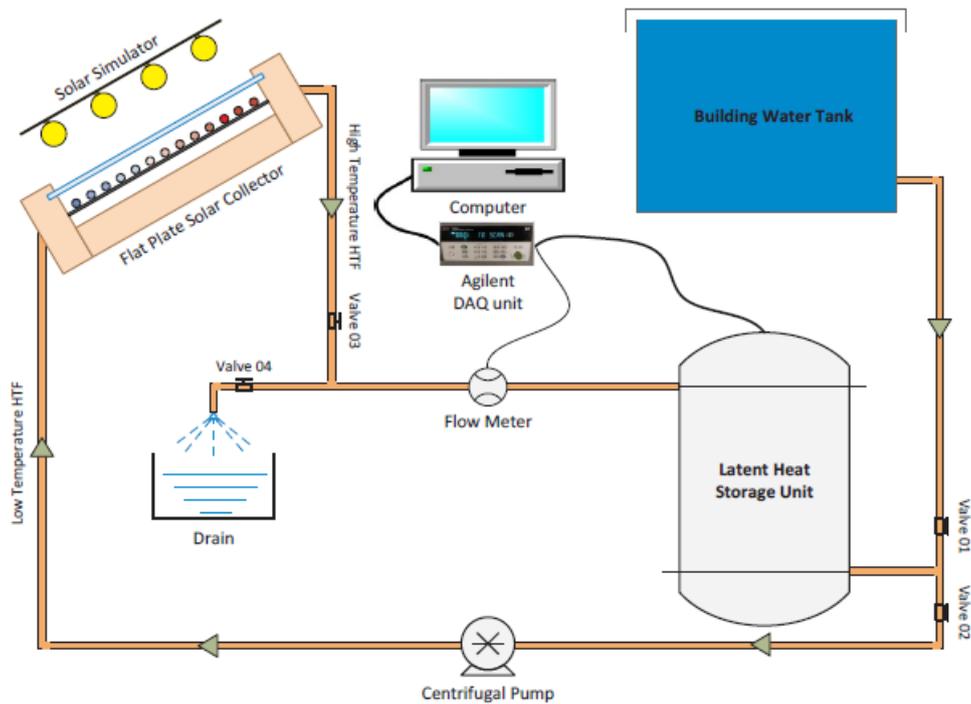
**Figura 10.** Sección de un tubo de vacío a) sin PCM b) con PCM en su interior.

Se estudia la influencia que tiene la parafina en el rendimiento térmico del colector de tubos de vacío. El fluido es impulsado por la bomba hacia el colector, donde tras pasar por él, llega al intercambiador donde transfiere calor al fluido frío. Durante las horas de carga, el colector transfiere energía en forma de calor hacia el fluido, el cual se calienta al paso por él. Gracias a la parafina, la cantidad de calor útil almacenada es mayor que sin ella, aumentando la temperatura del fluido de trabajo y reduciendo las pérdidas de calor en la instalación. Por otro lado, durante el periodo de descarga, la parafina transfiere la energía que almacenó en el periodo de carga, aumentando así la temperatura del fluido en horas donde la radiación es insuficiente o inexistente.



**Figura 11.** Investigación solar de P. Felinski, R. Sekret

*Zakir Khan, Zulfiqar Ahmad Khan, 2017[15]*, tiene por objetivo estudiar la eficiencia del acumulador de energía latente durante el periodo de carga. El sistema está compuesto por un colector solar de placa plana con energía solar simulada mediante un simulador solar, un tanque de almacenamiento de calor latente, bomba centrífuga de circulación, conexión al tanque de agua de red y unidad de adquisición de datos con ordenador, además de la instrumentación necesaria para la toma de datos.



**Figura 12.** Instalación de Zakir Khan, Zulfiqar Ahmad Khan

La válvula 1, se abre liberando agua para la instalación directamente la red, posteriormente se cierra para crear un sistema cerrado. Gracias a una bomba centrífuga el fluido es circulado por la instalación. Al paso del fluido por el colector, va ganando energía en forma de calor aumentado así su temperatura. Tras el colector, el fluido pasa a través del acumulador de energía de calor latente donde transfiere su energía al PCM. En este proceso de carga, todo el volumen de PCM pasa a estado líquido almacenando toda la energía disponible. El proceso se termina cuando la energía captado por el colector es insuficiente, y da comienzo al proceso de descarga que consiste en la liberación de la energía de PCM al fluido para aumentar su temperatura. Disminuyen los tiempos de fusión del material gracias al novedoso sistema de almacenamiento, tiempos menores que en instalaciones anteriormente descritas.

Por último, y de manera global para todas las instalaciones que se han estudiado, la instrumentación que han utilizado para la adquisición de las principales variables, ha sido la misma para todas las instalaciones ya que tienen un fin común.

Básicamente, se ha utilizado los siguientes elementos de medida:

- Piranómetro, mide la radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra de una manera precisa.
- Caudalímetro, mide el flujo másico de fluido que circula por el circuito.

- Termopares, utilizados para tener detalle de la temperatura del fluido en determinadas zonas, sobre todo, en el intercambiador, zona donde se encuentra los PCM.
- Manómetros, marca la presión que tiene en cada momento la instalación.

### 4.3 Propiedades termo-físicas de los materiales de cambio de fase utilizados.

En las instalaciones descritas en el apartado anterior se han utilizado diversos tipos de materiales de cambio de fase (PCM). Se han seleccionado atendiendo a las necesidades y características de los procesos que se llevaron a cabo en sus investigaciones.

Según lo definido en el apartado 2 del TFG, se consideran instalaciones de energía solar térmica de baja temperatura, aquellas que trabajan a temperaturas menores o iguales a 100-120 °C mediante la energía solar. En ellas principalmente, los materiales de cambio fase tienen que tener una alta capacidad de almacenamiento de energía, eso se consigue con una densidad elevada para poder almacenar la mayor cantidad de energía, además de tener una capacidad de almacenamiento de calor latente alta por unidad de volumen.

Otro punto a tener en cuenta, es que la temperatura de fusión de PCM está definida, así se puede seleccionar materiales cuya temperatura este en el rango de operación de la instalación optimizando el proceso que se lleve a cabo en ella.

Otras propiedades también a considerar (físicas, químicas, cinéticas y térmicas) son factores a tener en cuenta a la hora de la correcta selección de PCM, como son la variación de volumen en cambio de fase, no susceptible a subenfriamientos, alto ratio de nucleación... A continuación, se describe los PCM utilizados en las instalaciones descritas en el anterior apartado reflejando sus características principales.

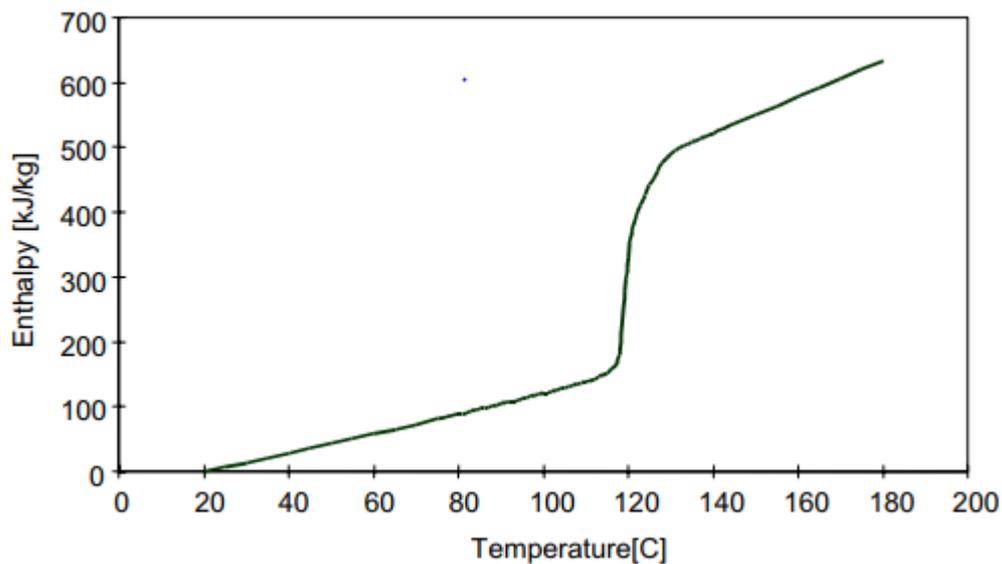
En el estudio de *S.D. Sharma, Takeshi Iwata, Hiroaki Kitano, Kazunobu Sagara [1]* (

Figura 5) selecciona el erythritol como PCM. La elección se basa principalmente en la temperatura de fusión, calor latente de fusión, densidad y otras consideraciones como son la no toxicidad, propiedades corrosivas y coste.

Propiedades Termo-Físicas del erythritol	
Estructura Molecular	$C_4H_{10}O_4$
Punto de Fusión (°C)	118.0
Entalpia de fusión (kJ/Kg)	339.8
Calor especifico (kJ/Kg K)	1.38 a 20°C
Densidad (Kg/m3)	1.48 a 20°C
Conductividad térmica (Km/W)	2.64 a 20°C

**Tabla 6.** Propiedades Termo-Físicas erythritol

La temperatura de fusión del erythritol ronda los 118 ° C, con un alto calor de fusión (339 kJ/kg), condiciones necesarias para la eficiencia de la instalación, además de ser económico y con una alta disponibilidad en el periodo en el que se lleva a cabo de investigación. Como se ve en la Figura 13, desde que llega a su temperatura de fusión, el material almacena gran cantidad de energía, en torno a los 250 KJ/Kg, que durante el proceso de descarga que cederá al fluido calor-portador.



**Figura 13.** Relación Entalpía-Temperatura erythritol

*M.H. Mahfuz, M.R. Anisur, M.A. Kibria, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar [6]*, selecciona parafina como material de cambio de fase para su sistema de acumulación de energía sensible y latente. Este PCM se clasifica como material orgánico cuyas ventajas son no ser corrosivos, ni tóxicos, ni presentar problemas de subfusión, así como su buena estabilidad cíclica. Por el contrario, su conductividad térmica suele ser baja y son materiales inflamables.

Al tratarse de una instalación de baja temperatura, la parafina es idónea puesto que su punto de fusión entra dentro del rango de aplicación de estas instalaciones, además de tener un poder calorífico adecuado para la energía que se puede disponer en estos procesos solares. Otras propiedades, son su no toxicidad, material no corrosivo con una disponibilidad y precio aceptables.

<b>Propiedades termo-físicas de la cera parafina (RT44HC)</b>	
Propiedades	Valores
Temperatura de fusión (°C)	<b>40-44</b>
Calor latente de fusión (kJ/Kg)	<b>255</b>
Calor específico (Kj/Kg K)	<b>2</b>
Conductividad térmica (W/m K)	<b>0.2</b>
Densidad (Kg/m3)	<b>800</b>

**Tabla 7.** Propiedades Termo- Físicas parafina RT44HC

*Sohif Mat, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammada [5]*, en su diseño de acumulador de calor latente utiliza RT-82. PCM orgánico puro, material de almacenamiento de calor latente que utiliza procesos de cambio de fase para almacenar y liberar grandes cantidades de energía térmica a temperatura casi constante. Proporcionan un medio muy efectivo para almacenar calor y frío, incluso cuando los volúmenes son limitados. Posee una alta capacidad de almacenamiento de energía, no sufre efectos de subenfriamiento y son productos de alta duración, con un rendimiento estable a través de los ciclos de cambio de fase. A continuación, se reflejan sus características más importantes.

<b>Propiedades termo-físicas del RT-82</b>	
Propiedades	Valores
Punto de fusión (°C)	77-82
Capacidad de almacenamiento térmico (kJ/Kg)	170
Calor especifico (kJ/Kg K)	2
Densidad en solido (Kg/m3)	0.88
Densidad en liquido (Kg/m3)	0.77
Conductividad térmica (W/m K)	0.2
Temperatura de operación máxima (°C)	100

**Tabla 8.** Propiedades Termo-Físicas parafina RT-82

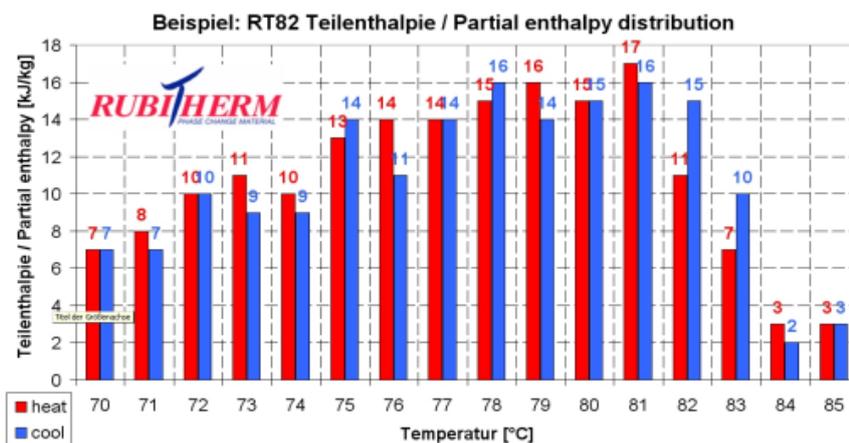


Figura 14. Relación Entalpía- Temperatura parafina RT-82

Oluwaseun S. Alajo, Victor C. Ibekwe, Emmanuel C. Nsofor [4] utiliza un material de cambio de fase patentado de su investigación basado en vegetales derivados de recursos 100% renovables. Es estable, no tóxico, no inflamable y biodegradable. Tiene propiedades muy aceptables para la instalación que se realizó, con propiedades térmicas óptimas, como puede ser la temperatura de fusión y una alta capacidad térmica.

Propiedades Termo-Físicas de PCM Biodegradable	
Propiedades	Valores
Temperatura de fusión (°C)	56
Calor latente de fusión (kJ/kg)	237
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	81
Calor específico en sólido (kJ /kg °C)	2.47
Calor específico en líquido (kJ /kg °C)	2.71

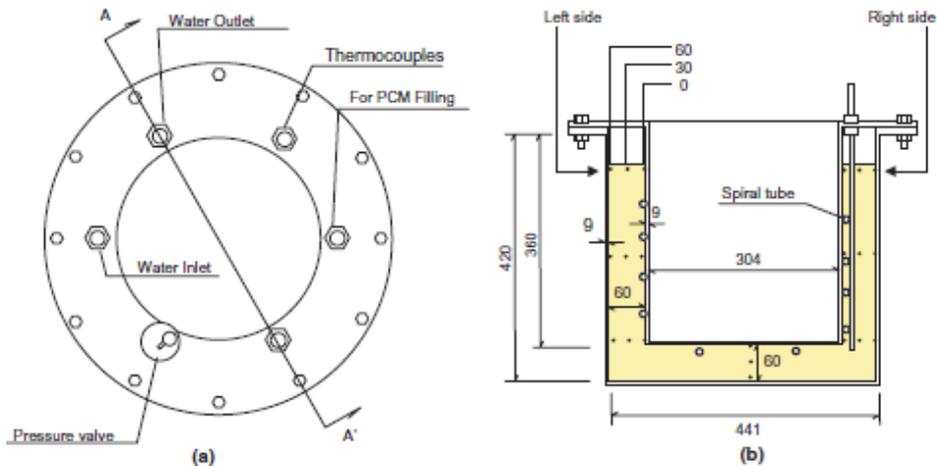
Tabla 9. Propiedades Termo-Físicas PCM Biodegradable

#### 4.4 Diseños de intercambiadores de calor para PCM

En este punto del TFG, hablaremos sobre los sistemas de almacenamiento de energía latente (TES, Termal Energy Systems) más relevantes, que se desarrollan en las instalaciones experimentales de diversos investigadores que se han comentado anteriormente.

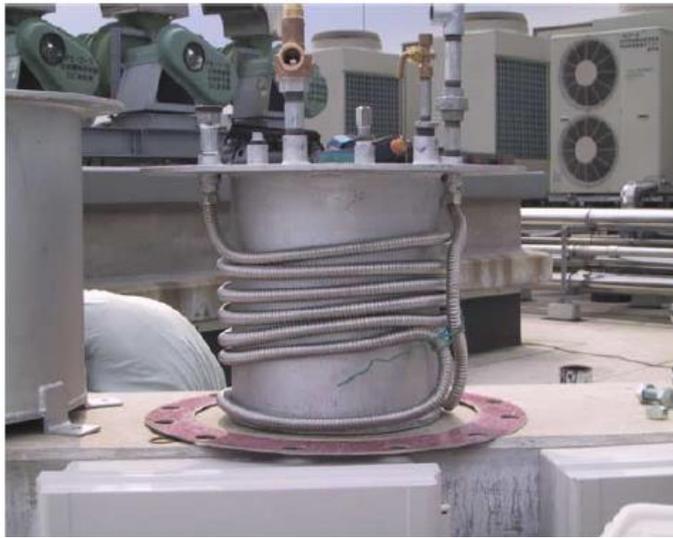
S.D. Sharma, Takeshi Iwata, Hiroaki Kitano, Kazunobu Sagara [1] desarrolla un acumulador formado por dos cilindros concéntricos horizontales de aluminio, en cuyo espacio intermedio se rellena con el PCM (Figura 5), que en este caso es erythritol (Tabla 6). Todos los materiales utilizados previenen y disminuyen las pérdidas de calor del dispositivo. El interior no se rellena por completo, puesto que durante en el cambio de fase

el volumen del material aumenta. Los kilogramos que se introducen en el dispositivo son calculados a partir de la cantidad de energía que se puede almacenar para fundir completamente la cantidad de PCM utilizada. Para introducir el fluido calor-transportador, dos orificios en la tapa del acumulador (entrada y salida) son necesarios para la entrada del fluido en el interior. A través de un serpentín, el fluido calor-transportador intercambia su energía, aumentando progresivamente la temperatura del PCM y logrando su cambio de estado durante el periodo de carga de la instalación.



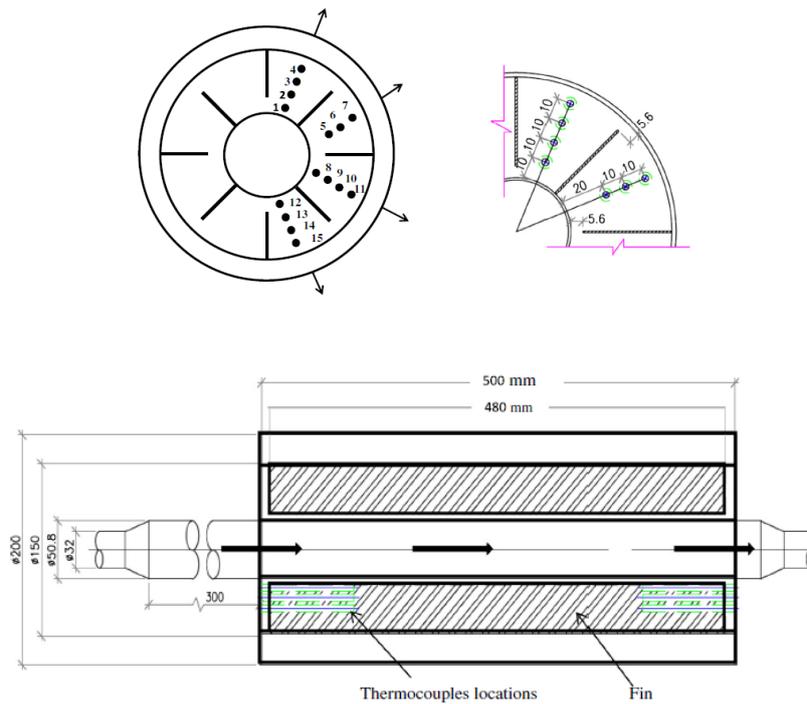
**Figura 15.** Vistas acumulador con PCM

Por otro lado, durante su periodo de descarga, el PCM ya en forma líquida debido a la transferencia de calor del fluido calor-transportador, libera progresivamente energía al paso del fluido que está a una temperatura menor. El proceso termina cuando toda la cantidad de material utilizado cambia de nuevo estado sólido. Todas estas operaciones están controladas por termopares colocados en posiciones específicas que muestran las temperaturas de entrada y salida del fluido, además del control de temperatura en todas las zonas del intercambiador.



**Figura 16.** Acumulador de energía de calor sensible y latente de S.D. Sharma, Takeshi Iwata

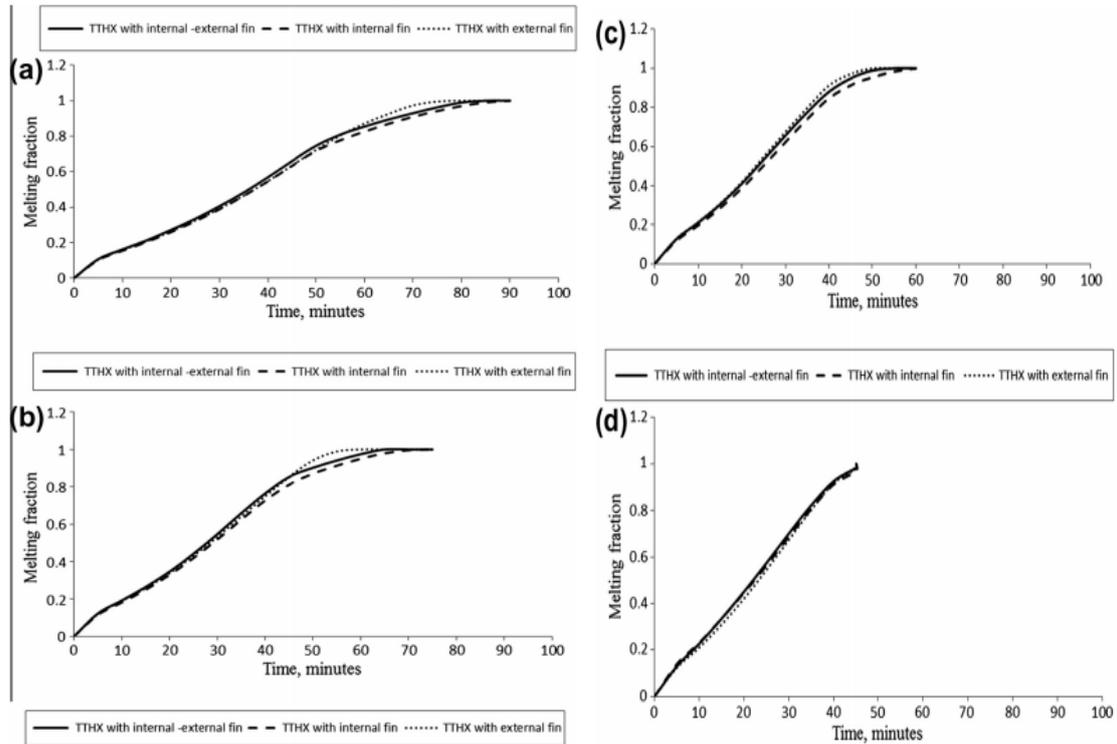
*Sohif Mat, Abduljalilx A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammada [5]* estudia la influencia en el acumulador de energía de calor latente de sistemas con aletas, y los beneficios que tiene para la eficiencia de la transmisión de calor.



**Figura 17.** Secciones del sistema de acumulación de calor sensible y latente Sohif Mat, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, Abdulrahman Th Mohammada.

Al igual que el anterior modelo, se basa en cilindros concéntricos horizontales, tres en este caso (Figura 17). En el cilindro intermedio se dispondrá el PCM y en los dos restantes circulará el fluido calor-transportador. Las aletas longitudinales se ubican en las caras del

cilindro intermedio, donde se aloja el PCM. Los resultados muestran que el sistema aleteado influye positivamente en la eficiencia de la transmisión de calor, aumentándola con respecto a los diseños que no disponen de éstas. De este modo se consigue un aumento en la fusión del PCM y un reparto homogéneo por todo el sistema de intercambio. Se demostró que cuanto más grandes sea este sistema aleteado, menor será el tiempo de fusión del PCM (Figura 18).

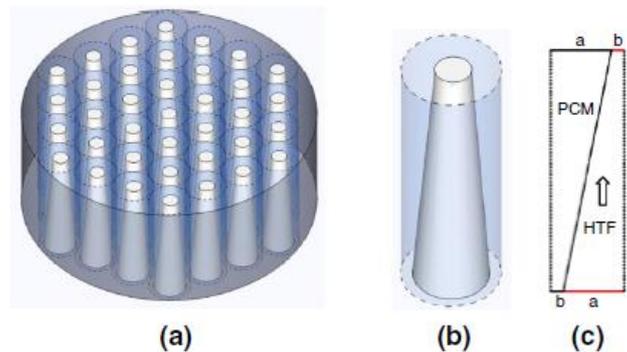


**Figura 18.** Tiempos de carga dependiendo de la longitud del sistema aleteado.

*Zhipei Hu, Angui Li, Ran Gao, Haiguo Yin [15]* investigan diseños de aletas en busca del modelo que proporcione mejores resultados en base a la eficiencia de la transmisión de calor. El sistema de almacenamiento térmico consiste en una carcasa exterior cilíndrica vertical y tubos interiores (aletas) en forma tronco-cónica (Figura 19). El fluido calor-transportador circula a través de los tubos internos, siendo el PCM encapsulado dentro del espacio entre la carcasa cilíndrica y los tubos. Se introduce dentro de la carcasa el número de tubos necesarios para la transmisión de calor uniforme por todo el volumen que ocupa.

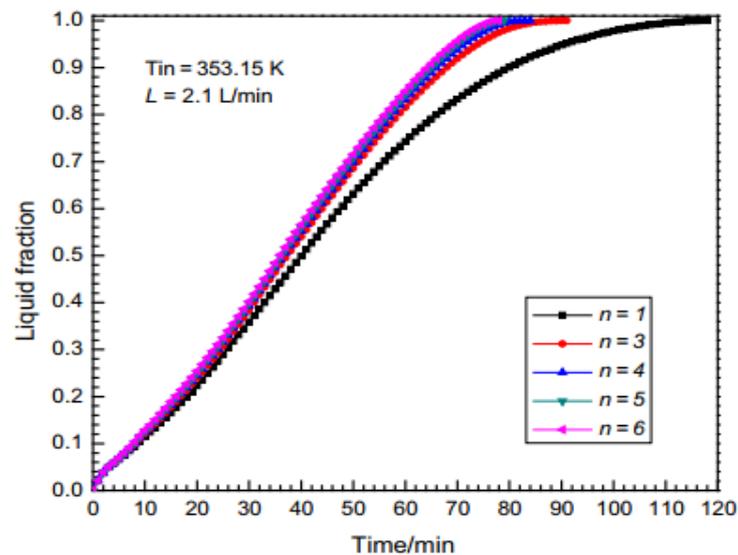
Durante la carga, el fluido de transferencia de calor caliente entra al recinto a través de la entrada inferior de las aletas tronco-cónicas, intercambiando calor con PCM sólido. Después de esta etapa, el fluido sale por la zona estrecha de la con una temperatura menor debido a la pérdida de energía. Se vio, que a diferencia de aletas cilíndricas u otro tipo,

estas son más eficientes a la hora de permitir la transmisión de calor, reduciendo el tiempo de fusión del material encapsulado.



**Figura 19.** Diseño interior acumulador de calor latente de Zhipei Hu, Angui Li, Ran Gao, Haiguo Yin

Los resultados (Figura 20) muestran que las aletas cuya relación entre el diámetro superior e inferior es de 6 tiene menor tiempo de fusión del material, mejorando la eficiencia en el proceso de carga en comparación con otras relaciones. Sin embargo, los tiempos son mayores que en comparación con las aletas longitudinales (figura 18).



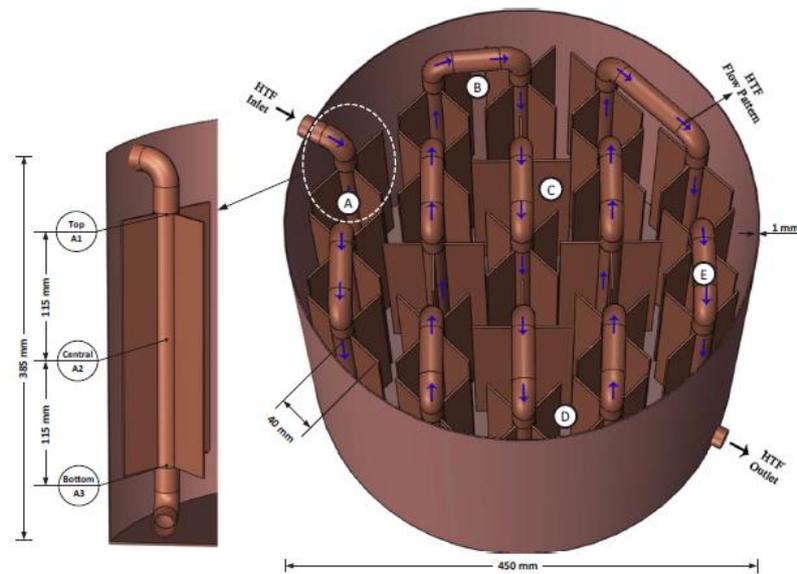
**Figura 20.** Tiempos de fusión según relación entre diámetros de aleta.

Estudios más recientes, como el de *Zakir Khan, Zulfiqar Ahmad Khan* [14] desarrolla para su instalación un acumulador de calor latente constituido por una carcasa exterior de cobre y una especie de malla de tuberías de cobre en su interior (

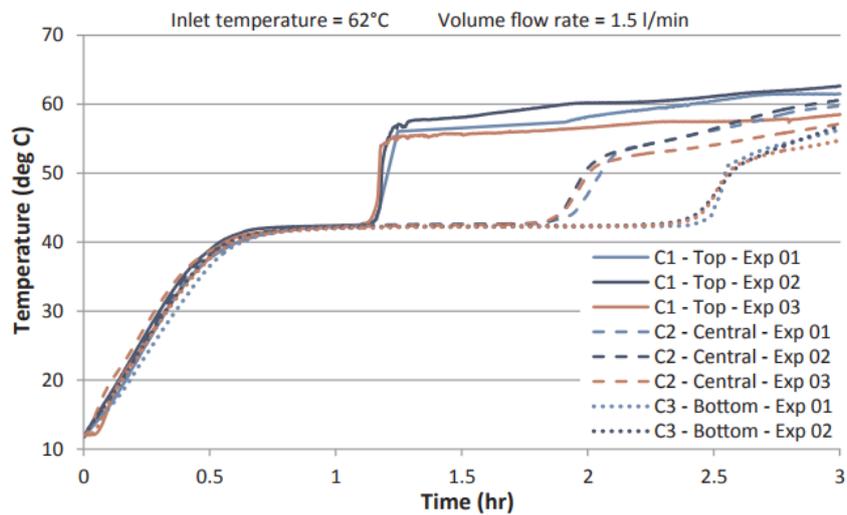
Figura 21).

La superficie exterior de la carcasa está debidamente aislada para disminuir las pérdidas que haya hacia el exterior. Las tuberías rellenan todo el interior del cilindro

contando con aletas longitudinales de poco espesor en los tramos líneas de la tubería. El acumulador es relleno con PCM, en esta investigación es la parafina, para la acumulación de energía. A diferencia del diseño anterior, éste solo tiene una entrada para el fluido calor-transportador puesto que es solo una única tubería la que se dispone por todo el interior del intercambiador. Tras varios experimentos se vio, una buena distribución del calor gracias a las aletas y una disminución del tiempo de fusión (Figura 22).



**Figura 21.** Diseño interior de acumulador de calor latente y sensible de Zakir Khan.



**Figura 22.** Tiempos de fusión del PCM

## Capítulo 5. Análisis de la instalación disponible, especificación de los parámetros de diseño y propuesta de modificación.

### 5.1 Descripción de la instalación disponible. Instrumentación.

El Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos dispone en la actualidad de un banco de ensayo de captadores solares térmicos “side-by-side” exterior (Figura 23), que permite la caracterización experimental de dichos elementos en condiciones reales de operación, así como, la evaluación de mejoras implementadas con objeto de optimizar su eficiencia térmica. Se ha planteado teniendo en cuenta la normativa vigente de forma que permite ensayar colectores solares térmicos a la intemperie, ensayando dos colectores simultáneamente.

Esta instalación experimental se basa o sigue el esquema de una instalación solar de baja temperatura. El rango de temperaturas de trabajo (entre 45°C y 60°C) se adapta a aplicaciones en el sector doméstico y en el terciario, como son los sistemas de climatización de piscinas, apoyo a sistemas de calefacción (especialmente, sistemas radiantes) y necesidades de ACS.

El componente principal de la instalación son los colectores solares. Se compone de dos captadores planos de diferentes características dispuestos en paralelo, que cuyo soporte es un seguidor solar anclado a la bancada, dispuesta en la cubierta del edificio de la UPCT.

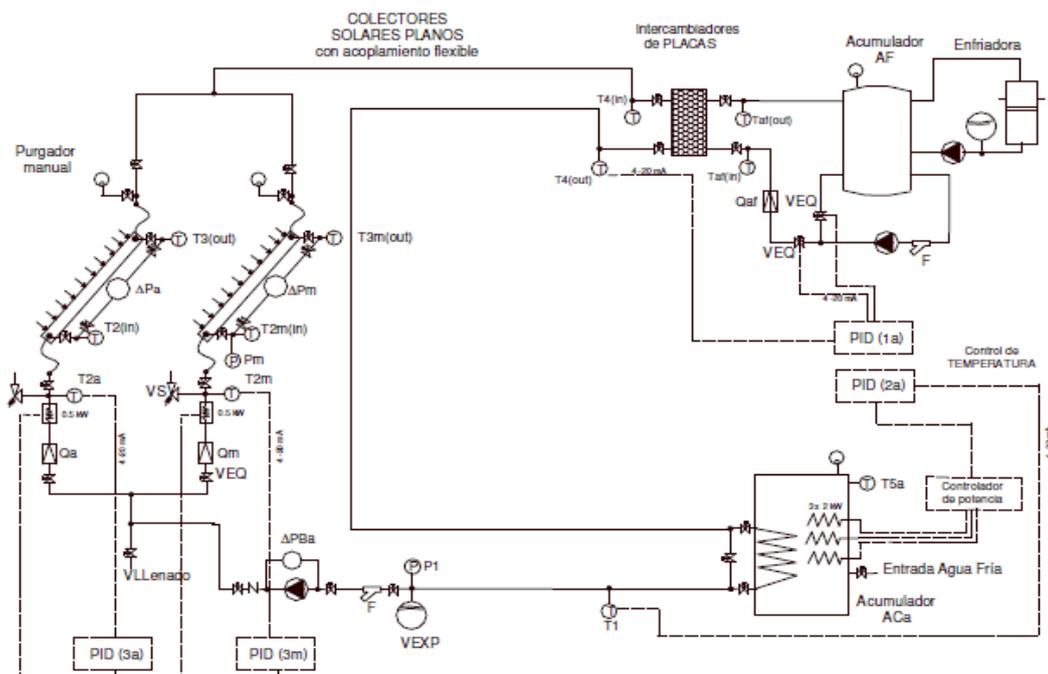
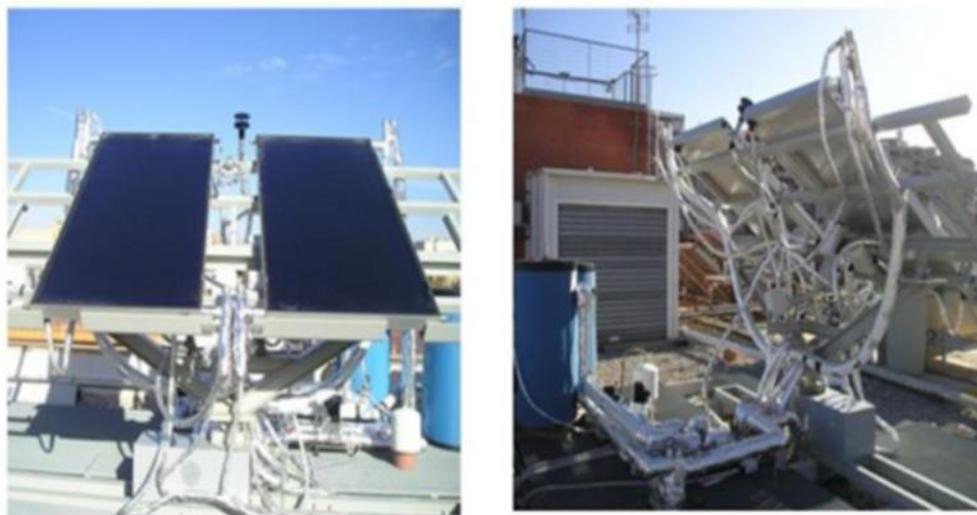


Figura 23. Esquema instalación actual UPCT

El banco de ensayos está formado por dos circuitos claramente diferenciados. El circuito primario donde están ubicados los colectores que se quiere ensayar y el circuito de enfriamiento formado por una enfriadora de agua, un depósito de acumulación, dos bombas y dos electroválvulas de solenoide proporcional 0-10 V de dos vías cuya apertura y cierre será la adecuada para garantizar que la temperatura del agua del circuito primario a la salida del intercambiador es la deseada. De esta forma, el agua tras ser calentada en los colectores solares va al intercambiador de placas donde es enfriada a la temperatura de consigna  $T4(out)$ . Para ello se dispone de agua fría acumulada en el depósito Acumulador AF. Esta agua es enfriada con la enfriadora de aire-agua de Ciatesa instalada en el sistema.



**Figura 24.** Vista real instalación actual UPCT

La temperatura del agua del circuito primario una vez que sale del intercambiador de la enfriadora se puede elevar mediante el depósito intermedio que hay entre el intercambiador y los colectores solares (Acumulador ACS). Este depósito tiene tres resistencias de 2 kW, que permiten llevar el agua a un valor de consigna  $T1$ . Finalmente, el agua es bombeada a los colectores mediante la bomba del circuito primario que puede ser accionada a velocidad variable mediante un variador de frecuencia. Con las resistencias de inmersión de 0,5 kW que se observan a la entrada de los colectores se eleva la temperatura del agua hasta el valor deseado en cada ensayo.

Todos los parámetros y datos de la instalación son medidos gracias a la instrumentación (caudalímetros, termopares, sondas de presión...) necesaria para definir completamente la instalación como se muestra en el esquema.

A continuación, se hace un pequeño resumen de los componentes que forman la instalación, tanto circuito primario como secundario.

- Circuito primario:
  - Bomba y variador de frecuencia
  - Resistencias de inmersión (calentadores de ajuste fino)
  - Electroválvulas de dos vías con servomotor que permite regular caudal
  - Colectores
  - Intercambiador de placas
  - Depósito de acumulación de agua caliente con resistencias eléctricas (Acumulador ACa)
  - Vaso de expansión
  - Valvulería y accesorios (válvulas de esfera, de seguridad, antirretorno, purgadores, filtros, tuberías y aislamiento)
  - Sensores (caudalímetros, transmisores de presión absoluta y diferencial y RTDs)
- **Circuito secundario**
  - Bombas
  - Electroválvulas de dos vías con servomotor que permite regular caudal
  - Intercambiador de placas
  - Depósito de acumulación de agua fría (Acumulador AF)
  - Enfriadora
  - Valvulería y accesorios (válvulas de esfera, de seguridad, antirretorno, purgadores, filtros, tuberías y aislamiento)
  - Sensores (únicamente RTDs)

## **5.2 Especificación de los parámetros de diseño de la nueva instalación.**

Se va a desarrollar el estudio del diseño de una instalación experimental para procesos de carga y descarga en instalaciones solares térmicas de baja temperatura con sistemas de almacenamiento de calor sensible y latente (LHS) con PCM.

La instalación que dispone actualmente la UPCT nos servirá de ejemplo a la hora de determinar nuestro nuevo diseño, siendo éste totalmente nuevo y con un fin diferente al que tiene la instalación actual.

Para su diseño, habrá que especificar nuevos parámetros para una correcta selección, tanto de equipos como de instrumentación. Éstos, se exponen a continuación.

### **5.2.1. Selección del PCM.**

Para la operatividad del acumulador de calor sensible y latente que se va a desarrollar, parte importante es la selección del PCM.

Al igual que investigaciones analizadas en Capítulo 2, nos inclinaremos por seleccionar un material de tipo orgánico, como ya enunciamos en el Capítulo 3, cuya temperatura de fusión sea baja y entalpia de fusión alta, para almacenar grandes cantidades de energía, para luego cederla al fluido de trabajo en el periodo de descarga de la instalación. También, influirá propiedades como el no sufrir subenfriamiento, variación baja de volumen en cambio de fase, alto grado de nucleación, entre otras. Además, se tendrá en cuenta la disponibilidad que haya de los proveedores de PCM y el precio de cada uno de ellos.

Tras la búsqueda se ha optado por selección la parafina Rubitherm RT70HC. PCM puro, que utiliza los procesos de cambio de fase entre sólido y líquido (fusión y congelación) para almacenar y libera grandes cantidades de energía térmica a temperatura casi constante. Proporcionan un medio muy efectivo para almacenar calor y frío, incluso cuando los volúmenes son limitados y las bajas diferencias en la temperatura de operación es aplicable.



**Figura 25.** Formato comercial parafina RT70HC

También destacar, que su disponibilidad también ha influido a la hora de su selección ya que no hay muchas empresas que trabajen en la elaboración de este tipo de sustancias. El precio en comparación con el mercado, ha sido de lo más económico que se puede encontrar con las características que necesitamos. Vendrá, como se ve en la imagen, en

pellets de pequeñas dimensiones y en sacos de 30 kg. La cantidad total de PCM a utilizar vendrá determinada por la energía disponible para fundir el PCM elegido. Como se muestra en el punto 5.2.2, podremos hacer uso de aproximadamente 200 kg de este material en base a cálculos iniciales.

Propiedades Termo-Físicas RT70HC	
Propiedades	Valores
Punto de Fusión	69-71 °C
Capacidad de almacenamiento térmico +- 7.5%	260 kJ/kg
Capacidad de almacenamiento en el rango de 62 a 77°C	72 Wh/kg
Capacidad de calor específico	2 kJ/kg k
Densidad en forma sólida	0.88 kg/l
Densidad en forma líquida	0.77 kg/l
Conductividad térmica (dos fases)	0.2 W/m k
Volumen de expansión	12.5%
Máxima temperatura de operación	100 °C

Tabla 10. Propiedades Termo-Físicas RT70HC

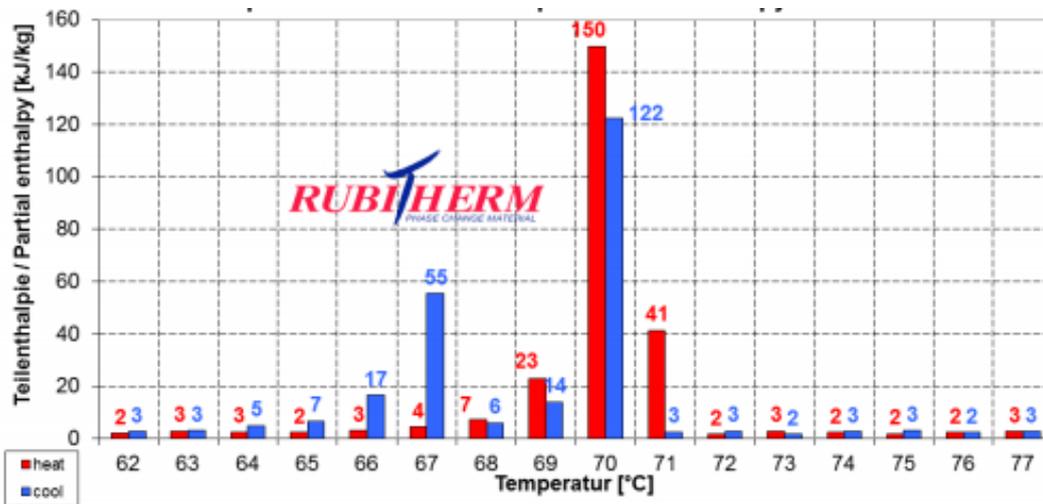


Figura 26. Relación entre la Entalpía y temperatura del RT407HC

### 5.2.2. Energía Disponible.

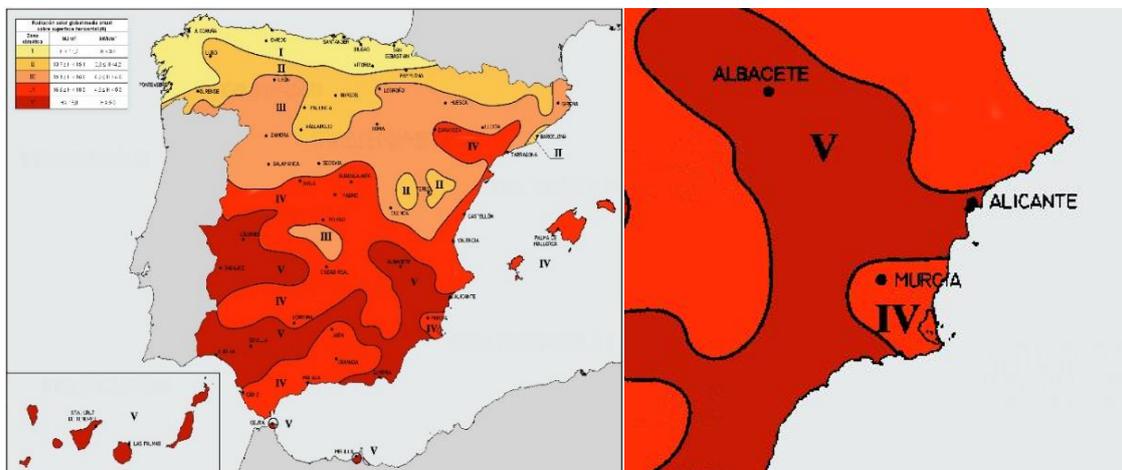
Un factor importante a tener en cuenta para el diseño de la instalación solar, es la energía disponible que tendremos durante todo el año en la ubicación donde se va montar la instalación. Ésta, vendrá determinada por la zona climática en la que se implante, irradiación media disponible  $I$  ( $W/m^2$ ), el número de horas de calor útil durante el día, y

otros factores más a tener en cuenta como pueden ser, orientación, sombras...etc. Todas estas variables, influirán a la hora de elegir tanto la superficie de captación solar, el número de colectores a utilizar, el caudal y el volumen de PCM que se puede fundir, entre otros.

La ubicación concreta de la instalación será en la cubierta del edificio ELDI perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena. Según el CTE (Código Técnico de la Edificación), el territorio español se divide en cinco zonas en función de la radiación solar global media diaria anual sobre superficie horizontal. La localidad de Cartagena pertenece a la zona climática IV, zona de radiación anual elevada, ideal para el estudio de la instalación que se propone en este trabajo.



**Figura 27.** Ubicación Edificio ELDI.

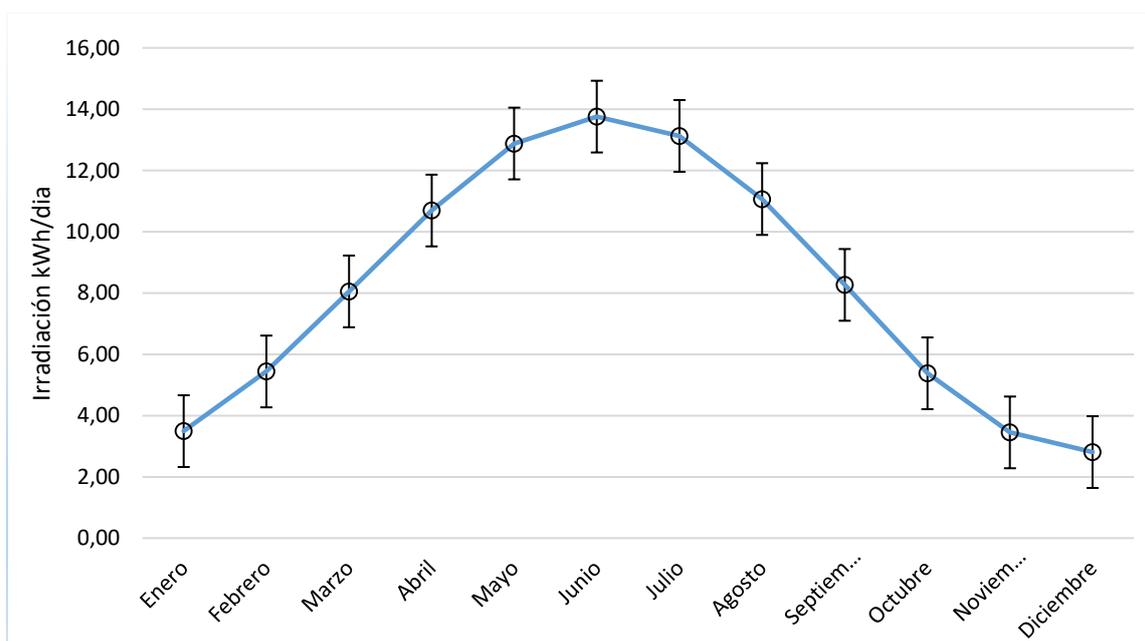


**Figura 28.** Zona climática de Cartagena, según CTE.

Cálculos iniciales, nos dan una aproximación de la energía disponible que tendremos en la ubicación elegida en base al colector solar utilizado que en este caso serán colectores solares de tubos de vacío marca Viessmann modelo Vitosol 300-TM (más detalle en el apartado 6.1.1).

	Radiación Diaria Media (Wh/m <sup>2</sup> día)	Horas de sol útil	Irradiancia media (W/m <sup>2</sup> )	Tamb (°C)	Rendimiento	Irradiación (Wh/día)
Enero	2426,99	8,00	303,37	10,60	0,47	<b>3.491,82</b>
Febrero	3319,41	9,00	368,82	16,60	0,54	<b>5.439,21</b>
Marzo	4516,79	9,00	501,87	14,30	0,59	<b>8.051,66</b>
Abril	5712,96	9,50	601,36	16,50	0,62	<b>10.691,99</b>
Mayo	6636,26	9,50	698,55	20,00	0,64	<b>12.879,10</b>
Junio	6965,24	9,50	733,18	24,20	0,65	<b>13.756,87</b>
Julio	6639,59	9,50	698,90	27,20	0,65	<b>13.126,73</b>
Agosto	5714,6	9,50	601,54	27,60	0,64	<b>11.065,97</b>
Septiembre	4472,1	9,00	496,90	24,20	0,61	<b>8.264,40</b>
Octubre	3247,36	9,00	360,82	19,80	0,55	<b>5.378,83</b>
Noviembre	2358,34	8,00	294,79	14,60	0,48	<b>3.450,34</b>
Diciembre	2057,23	7,50	274,30	11,50	0,45	<b>2.808,16</b>

**Tabla 10.** Irradiación diaria absorbida por un colector Vitosol 300-TM.



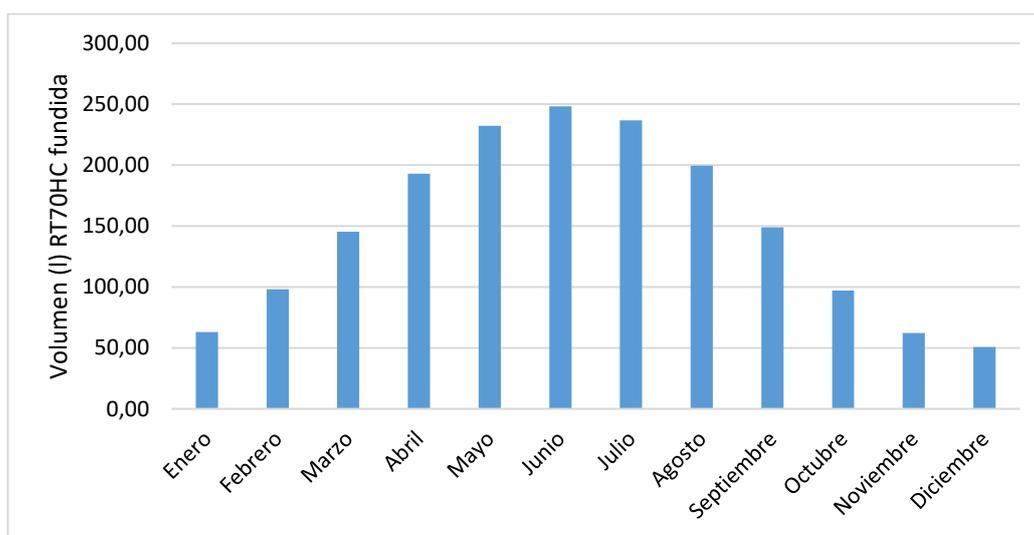
**Figura 29.** Irradiación solar sobre plano horizontal colector mensual colector Vitosol 300-TM.

Como se muestra en la Figura 29, se dispondrá de una energía máxima en la época de verano, donde el valor máximo alcanzado se sitúa en el mes de junio con una Irradiación diaria de 13,75 kWh/día y el valor mínimo se sitúa en la época de invierno, en concreto en el mes de diciembre con un valor de 2,80 kWh/día.

Podemos obtener con estos valores, la cantidad de PCM que se puede fundir durante el día de acuerdo a la capacidad de almacenamiento de calor del PCM elegido (parafina RT70HC Tabla 13), que en este caso será 72 Wh/kg.

	Irradiación (Wh/día)	Masa de PCM fundida (Kg/día)	Volumen de PCM liquido (litros)
Enero	3491,82	48,50	<b>62,98</b>
Febrero	5439,21	75,54	<b>98,11</b>
Marzo	8051,66	111,83	<b>145,23</b>
Abril	10691,99	148,50	<b>192,86</b>
Mayo	12879,10	178,88	<b>232,31</b>
Junio	13756,87	191,07	<b>248,14</b>
Julio	13126,73	182,32	<b>236,77</b>
Agosto	11065,97	153,69	<b>199,60</b>
Septiembre	8264,40	114,78	<b>149,07</b>
Octubre	5378,83	74,71	<b>97,02</b>
Noviembre	3450,34	47,92	<b>62,24</b>
Diciembre	2808,16	39,00	<b>50,65</b>

**Tabla 11.** Volumen de PCM que se puede fundir durante un día.



**Figura 30.** Volumen en litros, RT70HC

Estos valores, nos darán una aproximación del volumen que debe tener el acumulador de calor latente que se plantea diseñar, que en cuyo interior se alojará el material PCM, cuyo volumen máximo en estado líquido será de 248,14 litros de PCM y mínimo de 50 litros.

Nos inclinaremos a elegir un volumen inferior del mínimo, aproximadamente de 20 kg para cada acumulador, garantizando que todo el volumen del PCM se funda en el periodo de carga en un tiempo menor, puesto que tendremos más energía de la necesaria para el volumen elegido.

### **5.2.3 Temperatura de operación.**

La temperatura de operación vendrá determinada por la energía disponible que nosotros podremos captar y por la eficiencia del colector seleccionado. Necesitamos una temperatura de trabajo óptima para la aplicación que queremos desarrollar, siendo mayor que la temperatura de fusión de la parafina RT70HC, cuyo valor está comprendido entre 69-71 °C (Tabla 10). Se estima que la temperatura puede estar comprendida entre los 90-100°C.

Todos los equipos e instrumentación a utilizar serán capaces de soportar dicha temperatura sin causar ningún tipo de cambio en la naturaleza de los materiales debido a la fatiga térmica a la que van a ser sometidos.

### **5.2.4 Fluido de trabajo.**

Normalmente en instalaciones solares de baja temperatura se puede utilizar, agua o mezcla de esta con aditivos que mejoren sus propiedades. Los aditivos más usuales son los anticongelantes, aunque en ocasiones se puedan utilizar aditivos anticorrosivos. El contenido en sales se ajustará a los señalados en los puntos siguientes:

a) La salinidad del agua del circuito primario no excederá de 500 mg/l totales de sales solubles. En el caso de no disponer de este valor se tomará el de conductividad como variable limitante, no sobrepasando los 650  $\mu$ S/cm.

b) El contenido en sales de calcio no excederá de 200 mg/l. expresados como contenido en carbonato cálcico.

c) El límite de dióxido de carbono libre contenido en el agua no excederá de 50 mg/l.

Fuera de estos valores, el agua deberá ser tratada.

El diseño de los circuitos evitará cualquier tipo de mezcla de los distintos fluidos que pueden operar en la instalación.

Tanto para el circuito primario como para el secundario, el fluido será agua, suministrada directamente desde la red principal del edificio ELDI.

### **5.2.5 Caudal.**

El caudal estará definido por el rango de caudales óptimos para los colectores solares y deben ser adecuados para el proceso de carga y descarga de la instalación, pudiendo ser el mismo para los dos procesos anteriores, o distintos. Dependerá de este parámetro, la eficiencia en la transferencia de calor en el acumulador de calor latente y sensible con PCM,

puesto que este puede variar los tiempos en los procesos de carga y descarga. Es por todo lo anterior, que analizaremos varios caudales en busca del óptimo de la instalación, sin condicionar la eficiencia de los sistemas de captación de energía.

En nuestra instalación se diferencia dos tipos de caudales, uno para el proceso de carga y el otro, para el de descarga. Esto es debido, a que sus caudales son de valores muy diferentes. Además, estarán determinados por componentes principales de la instalación.

Se entiende como proceso de carga, la etapa en la cual el fluido calor-transportador cede la energía almacenada, tras el paso por el colector solar, al acumulador de calor latente y sensible en donde se encuentra el PCM (en estado sólido), llevando a éste a temperaturas de fusión.

El colector solar seleccionado modelo Vitosol 300-TM, determina el caudal óptimo para el proceso de carga puesto que será, el adecuado para la mayor transferencia de calor del colector hacia el fluido calor-transportador, siendo el caudal óptimo 78 l/h por cada colector. En nuestro caso, tenemos la intención de instalar cuatro colectores solares de tubos de vacío, el caudal dependerá del número de equipos que estén en uso, teniendo un rango que comprenderá desde los 78l/h hasta los 312 l/h.

N.º de colectores en uso	Caudal (l/h)
1	78
2	156
3	234
4	312

**Tabla 12.** Caudales de carga instalación dependiendo del número de colectores activos.

En cuanto al proceso de descarga, el fluido del circuito principal pasa por los acumuladores de calor (sin paso por colector solar debido a la inexistencia de radiación solar) para aumentar su temperatura debido a la transmisión de calor que se da entre el PCM, en estado líquido y a una temperatura elevada tras proceso de carga, y el fluido calor-transportador. Es por ello, que el caudal de descarga solamente dependerá del acumulador. Se pretende instalar dos acumuladores con una capacidad de aproximadamente 20 litros cada uno de ellos, así pues, 20 l/min será aproximadamente el caudal elegido para cada acumulador.

N.º de acumuladores en uso	Caudal (l/min)
1	20
2	40

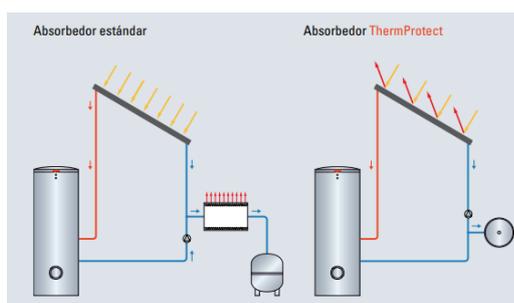
**Tabla 13.** Caudal para proceso de descarga según acumuladores en uso.

### 5.2.6 Prevención a sobrecalentamientos.

El sistema deberá estar diseñado de tal forma que, con altas radiaciones solares prolongadas sin consumo de agua caliente, no se produzcan situaciones en las cuales el usuario tenga que realizar alguna acción especial para llevar al sistema a su forma normal de operación.

Cuando el sistema disponga de la posibilidad de drenajes como protección ante sobrecalentamientos, la construcción deberá realizarse de tal forma que el agua caliente o vapor del drenaje no supongan ningún peligro para los habitantes y no se produzcan daños.

Para evitar todo este tipo de inconvenientes, se opta por seleccionar captadores solares de tubos de vacío con tecnología Heat-Pipe con desconexión por temperatura ThermProtect patentado por la marca Viessmann. Auto elimina la absorción de energía a partir de una determinada temperatura del absorbedor. Este nuevo tratamiento consta de varios niveles. Uno de ellos, está formada por una capa de dióxido de vanadio. A partir de una temperatura determinada, la estructura cristalina del material del absorbedor, realizada una transición estructural que provoca el aumento de emisividad, limitando automáticamente la absorción de energía.



**Figura 31.** Absorbedor ThermProtect

Cuando la temperatura disminuye, el material vuelve a su estado inicial, dejando la energía solar de nuevo disponible. El cambio de la estructura cristalina es reversible y está disponible ilimitadamente, evitando problemas de sobrecalentamiento sin necesidad de equipos auxiliares de refrigeración.

### **5.2.7. Prevención de flujo inverso**

La instalación del sistema deberá asegurar que no se produzcan pérdidas energéticas relevantes debidas a flujos inversos no intencionados en ningún circuito hidráulico del sistema.

La circulación natural que produce el flujo inverso se puede favorecer cuando el acumulador se encuentra por debajo del captador, por lo que habrá que tomar, en esos casos, las precauciones oportunas para evitarlo.

En sistemas con circulación forzada se aconseja utilizar una válvula antirretorno para evitar flujos inversos, así pues, estas estarán colocadas aguas debajo de las bombas instaladas.

### **5.3 Adecuación de la instrumentación disponible.**

A la vista de los parámetros anteriormente descritos, necesitaremos equipos de medida que nos proporcione, en el rango de medidas de la instalación, datos que nos ayuden a describir el proceso que se llevaran a cabo en nuestra instalación experimental.

En la instrumentación necesaria diferenciaremos entre:

1. Condiciones ambientales: aquellos instrumentos que nos permiten obtener los valores de radiación solar y otras variables meteorológicas representativas.
2. Variables de operación: medición de parámetros propios específicos que posibilitan la caracterización de la instalación objeto de estudio.

Con lo que respecta a la instrumentación de condiciones ambientales, será idéntica a la instrumentación utilizada en la que disponemos actualmente, solamente habrá que calibrarla para que esté en condiciones de uso.

Por otro lado, con lo que respecta con las condiciones de operación de la instalación, se tendrá que utilizar equipos que tenga un rango de medida adecuados a los parámetros de diseño de la instalación anteriormente descritos. Mediremos todas las variables que tendremos que tener en cuenta, como son:

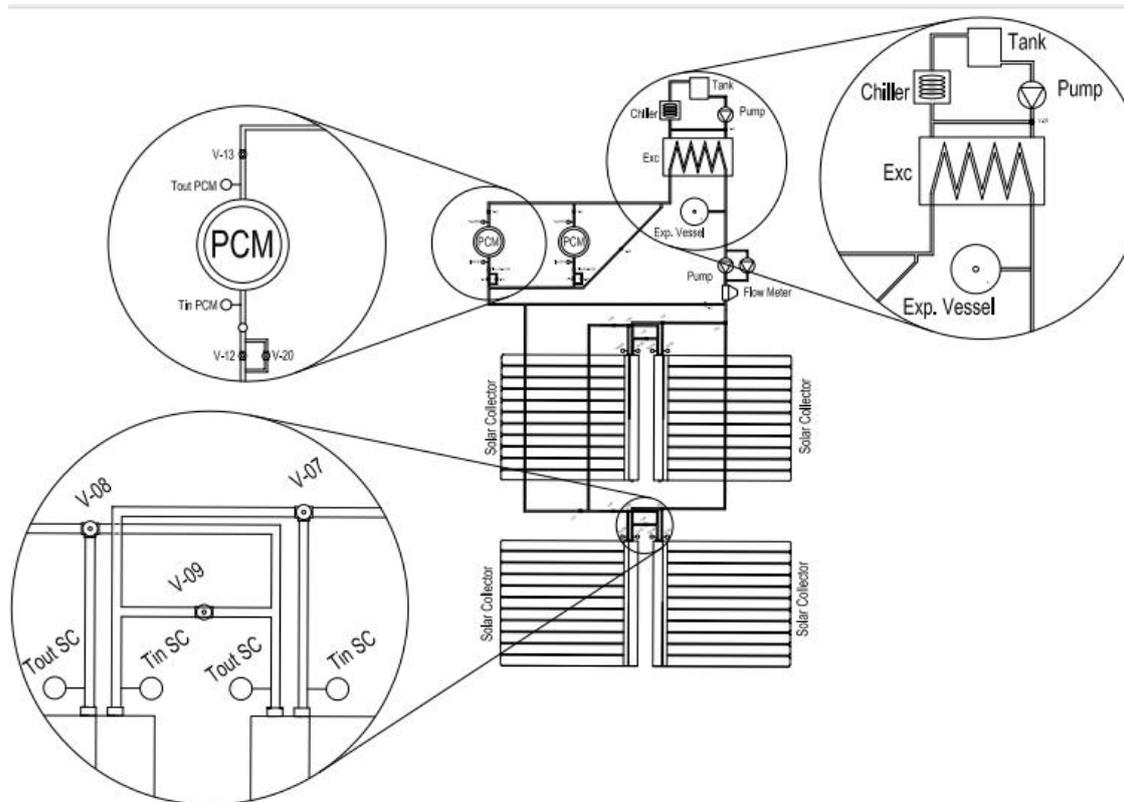
- Humedad relativa
- Temperatura ambiente
- Velocidad viento
- Dirección viento
- Radiación global

- Radiación difusa

Los parámetros de diseño de la nueva instalación difieren de la anteriormente instalada. Es por ello, que se tendrá que determinar nuevos instrumentos de medida que estén en el rango de operación del sistema. Todo este tipo de instrumentación (caudalímetros, termopares, anemómetros...) vendrá especificada en el capítulo siguiente anexando sus características técnicas.

#### 5.4 Propuesta de modificación de la instalación actual.

A continuación, se muestra la propuesta del sistema solar térmico con almacenamiento de calor latente con PCM que hemos desarrollado en nuestro trabajo de Fin de Grado (Figura 32). Como todos los sistemas solares de baja temperatura, nuestra instalación consta de dos circuitos, primario y secundario. El circuito primario es el principal, donde se ubica los equipos destacados, como son los colectores solares de tubos de vacío, acumuladores de calor sensible y latente con PCM, entre otros. En él, se llevará a cabo el proceso de captación de energía e intercambio de calor, principalmente. Por otro lado, el circuito secundario se destina a la refrigeración del sistema.



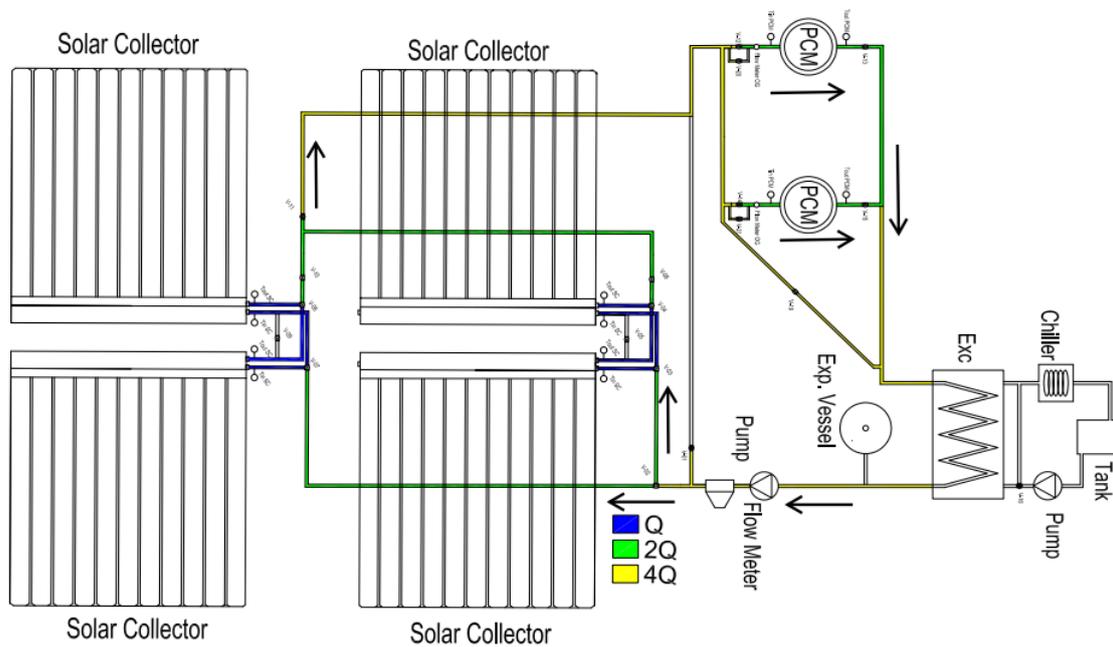
**Figura 32.** Esquema simplificado instalación solar propuesta UPCT.

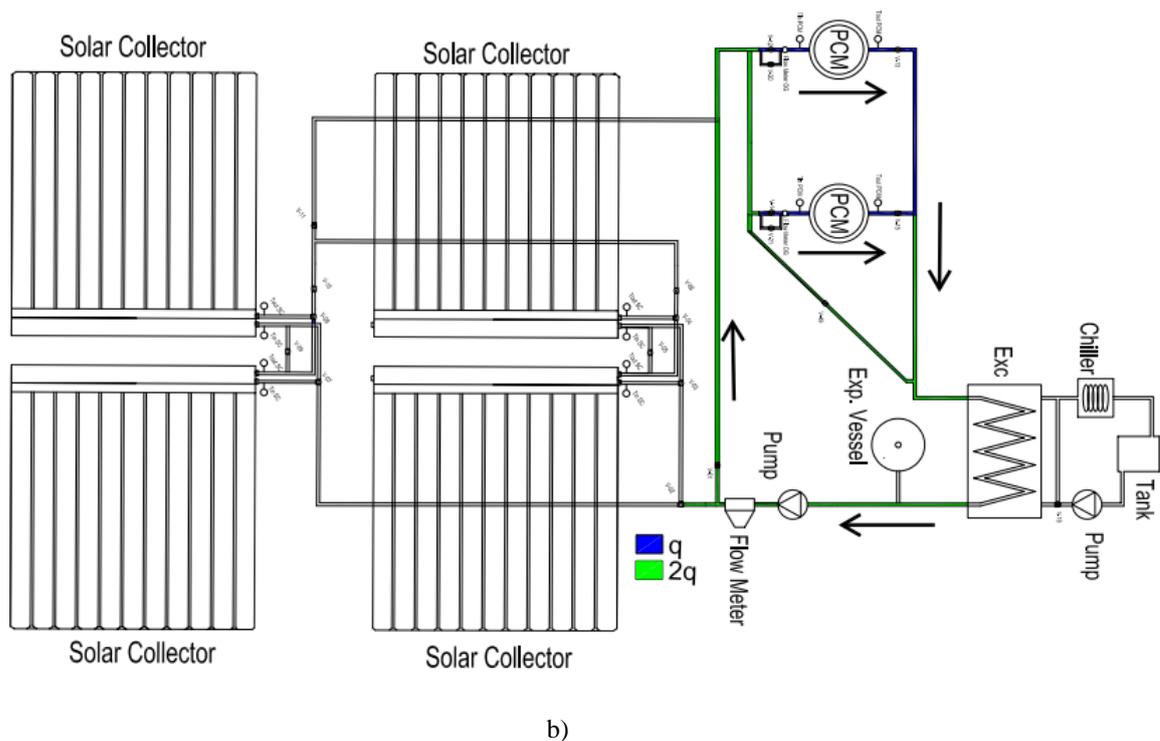
### 5.4.1 Circuito primario.

En esta parte del circuito se desarrollará el estudio del proceso de carga y descarga de la instalación. Como se ha comentado anteriormente, el proceso de carga es la etapa en la cual el fluido calor-transportador cede la energía almacenada en forma de calor, tras el paso por el colector solar, al acumulador de calor latente y sensible, llevando al PCM a temperaturas de fusión. En él, se estudiará, sobre todo, el tiempo de carga y la eficiencia del acumulador. La duración del proceso la define el tiempo en el que la radiación está presente, es decir en las horas de sol disponibles durante el día.

El proceso de descarga comenzará cuando la radiación ya no esté presente. En él, solamente se hará uso de los acumuladores de calor sensible y latente con PCM. La energía en forma de calor almacenada en el PCM, se cederá al fluido calor-transportador calentándolo al paso por el acumulador.

En la Figura 33, se muestra de una manera gráfica el circuito para cada proceso, carga como descarga, viendo los equipos del circuito primario que intervienen en cada uno de ellos, además de sus respectivos caudales.





**Figura 33.** Instalación experimental a) Proceso de carga b) Proceso de descarga.

La instalación consta principalmente de 4 colectores solares de tubos de vacío con tecnología heat pipe modelo Vitosol 300-TM. Se ha tomado la decisión de sustituir el anterior tipo de colectores por éstos, ya que su rendimiento es mayor que los planos y sus pérdidas de calor menores, además de conseguir temperaturas de trabajo mayores, entorno a los 90-100°C (se describirá con mayor detalle en el Capítulo 4).

Estos equipos, producen la captación de la radiación solar para liberarla al fluido calor-transportador que pasa a través de ellos, aumentando su temperatura hasta la óptima de trabajo. Para medir la temperatura de entrada y salida del colector, se instala en cada uno de ellos dos sensores de temperatura para medir en cada instante su variación.

Como se muestra en la Figura 34, los colectores están dispuestos en dos grupos, cada uno compuesto con dos colectores cada uno. Gracias a un sistema de válvulas, formado por válvulas de dos y tres vías, los colectores pueden trabajar con dos configuraciones distintas, en paralelo y en serie, según las necesidades de energía que tengamos.



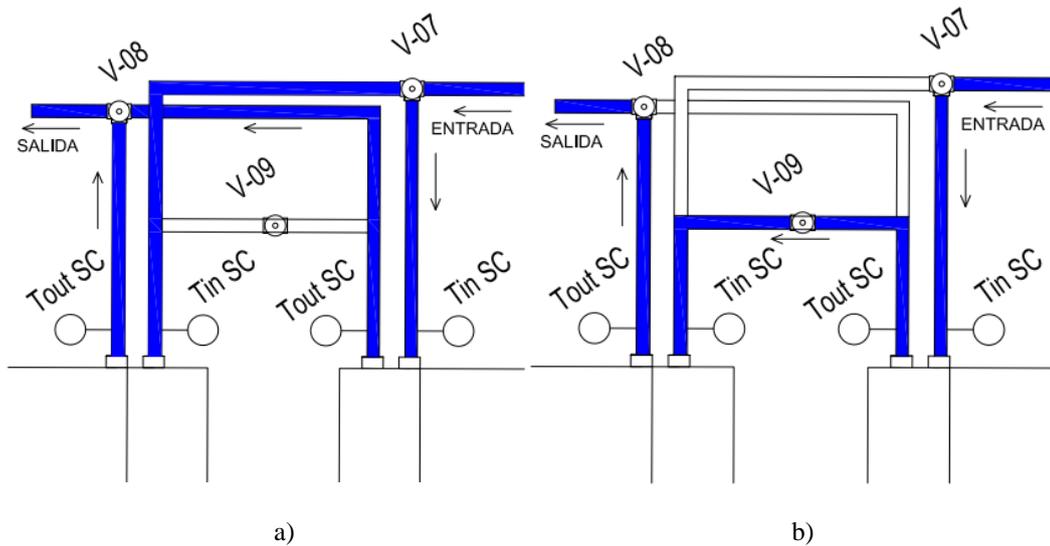
**Figura 34.** Disposición colectores solares Vitosol 300-TM

Cuando están en serie, el fluido pasa por los dos colectores que forman cada pareja, aumentando la temperatura de trabajo a unos valores superiores que al paso por solo un colector. Esta configuración, se aplicará cuando la temperatura del fluido al paso por solo un colector es sea insuficiente para fundir el PCM de los acumuladores. Esto puede surgir cuando la radiación captada sea insuficiente debido a periodos donde ésta sea baja o nula, o bien, cuando el caudal de trabajo sea mayor al óptimo del colector.



**Figura 35.** Sistema de válvulas para cada pareja de colectores solares

En la disposición en paralelo, por cada colector pasa el caudal óptimo de operación. El máximo número de colectores dispuestos en paralelo será cuatro. En esta disposición el caudal que circulará por el circuito será el máximo,  $4Q$  (l/h) siendo  $Q$  (l/h) el caudal óptimo para un solo colector.



**Figura 36.** Disposición de los colectores a) Paralelo b) En serie

Cuando la temperatura de salida de los colectores sea insuficiente, se procederá a la recirculación por los mismos mediante un sistema de tuberías que impide el paso hacia los acumuladores, forzando el paso de nuevo por los colectores solares para aumentar la temperatura de trabajo a valores mayores que la temperatura de fusión del PCM.

Tras el paso del fluido calor-transportador por los colectores solares, éste llega al sistema de acumulación de calor sensible y latente con PCM. Dispondremos de dos sistemas de acumulación dispuestos en paralelo (Figura 37). La entrada y salida estarán controladas mediante válvulas en las que se determina la apertura y cierre del acumulador. En la entrada de cada acumulador se montará un bypass, circulando por éste cuando estemos en el proceso de descarga. Además, dispondrán de termopares para controlar la temperatura y el reparto homogéneo en el interior del equipo. Cada sistema de acumulación, tiene un circuito de entrada/salida independiente para favorecer temas de mantenimiento, así no tener parada la instalación periodos largos de tiempo.



**Figura 37.** Acumuladores de calor latente y sensible con PCM

El caudal que circulará por cada uno de ellos, dependerá del proceso en el que estemos, ya sea carga o descarga. Como se ha comentado anteriormente, el caudal del proceso de carga será 78 l/h por cada colector en uso, teniendo el máximo de 312 l/h para cuatro colectores. Y para el proceso de descarga, 20 l/min por cada acumulador.

Todo el fluido del circuito primario, estará impulsado por dos grupos de bombeo diferentes, uno para carga y el otro para el proceso de descarga. Estos equipos estarán dimensionados para vencer las pérdidas de la instalación y a su vez, satisfacer los caudales requeridos para los distintos procesos.

Además, la instalación, contara con elementos de seguridad tales como vaso de expansión, válvulas de seguridad para regular la presión del sistema y purgadores para extraer el aire que se acumula en el interior del circuito primario, entre otros.

Todas las variables del sistema (presión, temperatura, radiación...) estarán controladas mediante una central de datos para el mejor estudio del sistema. Así, poder analizar de manera más eficiente cada uno de los procesos que se lleva a cabo la instalación.

#### **5.4.2 Circuito secundario.**

La función del circuito secundario será principalmente enfriar el fluido de trabajo a condiciones de temperatura de entrada al circuito primario. Está formado por los siguientes elementos (como muestra la Figura 32):

- Intercambiador de placas
- Enfriadora
- Tanque de almacenamiento
- Bomba del circuito secundario.

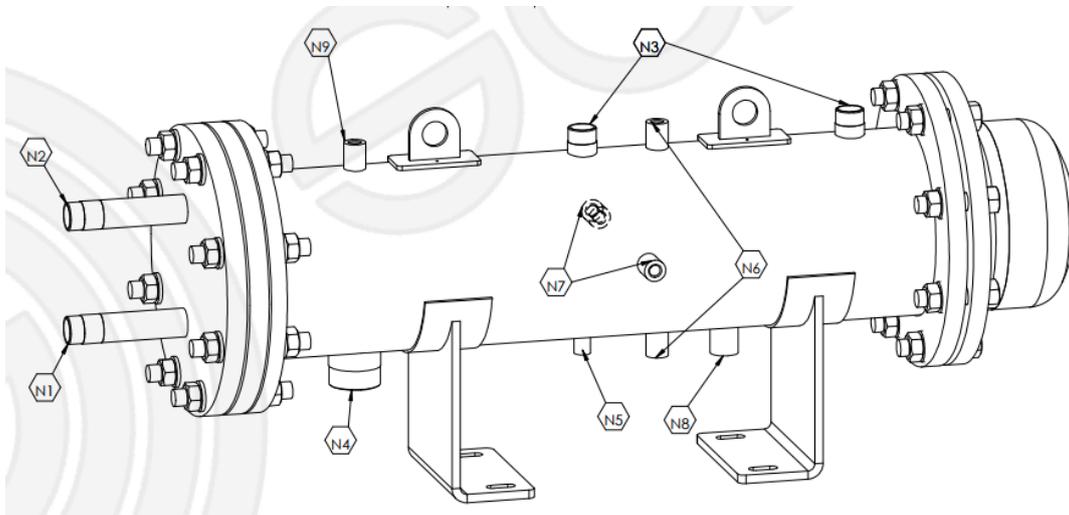
En el intercambiador de placas se produce el proceso de intercambio de energía entre el fluido primario y secundario. Su ubicación es después de los acumuladores de calor latente con PCM, teniendo que soportar las condiciones de temperatura y presión del sistema.

#### **5.5 Propuesta de diseño de los intercambiadores/acumuladores de PCM.**

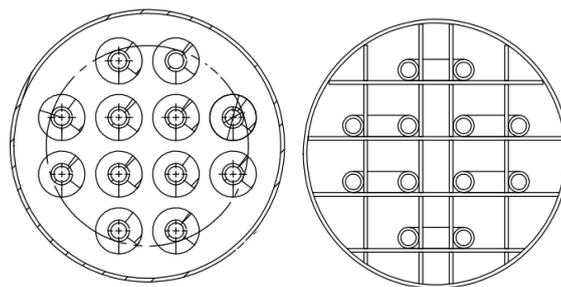
En este punto de nuestro TFG, nos centramos en el diseño que se ha desarrollado para el acumulador de calor latente con PCM.

Distintas configuraciones han sido estudiadas para desarrollar el acumulador de calor con PCM para nuestra instalación, sirviendo de pautas algunos diseños desarrollados en las investigaciones descritas en el Capítulo 3 de este trabajo.

Se desarrolla, un acumulador cilíndrico horizontal de acero debidamente aislado, para minimizar las pérdidas de calor con el exterior. En su interior, un entre mallado de rejillas de acero se dispone por todo el volumen interior del acumulador. Éstas, sostienen el sistema de tubos de cobre, en cuyo interior circulará el fluido calor-transportador. Dispone, de varios orificios de entrada y salida para los fluidos que intervienen en el proceso. Por el orificio N1, el fluido calor-transportador entra al acumulador donde atravesará todo el circuito de tubos del interior de este, hasta salir por N2 con una temperatura  $T_2$  inferior a la de entrada  $T_1$ .



**Figura 38.** Acumulador de calor latente y sensible con PCM.



**Figura 39.** Secciones en el interior del acumulador.

El llenado del intercambiador de PCM se hará por dos orificios N3. Este material, queda encapsulado entre en entre mallado y los tubos del interior del fluido. El espacio se llena en su totalidad por el material, dejando un espacio para su aumento de volumen durante cambio de fase. Por el orificio N7 se genera el vacío en el acumulador para extraer todo el aire del interior del acumulador. Las medidas de las variables que caracterizan al

intercambiador se tomarán por termopares y manómetro colocados en sus respectivos orificios. Todo este dispositivo está anclado por medio de dos sistemas de sujeción.

Para este sistema de acumulación de calor latente, se va a disponer de cera parafínica Rubitherm RT70HC (Tabla 10) como material de cambio de fase seleccionado. Se llenará el depósito con aproximadamente 20 kg de PCM en cada uno de los acumuladores. Para su llenado se ha tenido que fundir el PCM y conforme el aire se iba extrayendo, se iba introduciendo el PCM.

El número de acumuladores que se montarán en la instalación, serán dos. La diferencia que tienen ambos es el los tubos de cobre del interior, ya que uno dispone de aletas para mejorar la transferencia de calor, sin embargo, el otro, solo dispone de tubos lisos en su interior. Así, podremos determinar la diferencia entre los procesos que se lleven a cabo en los dos acumuladores, las temperaturas que se alcancen y la eficiencia en el reparto de la temperatura en su interior.

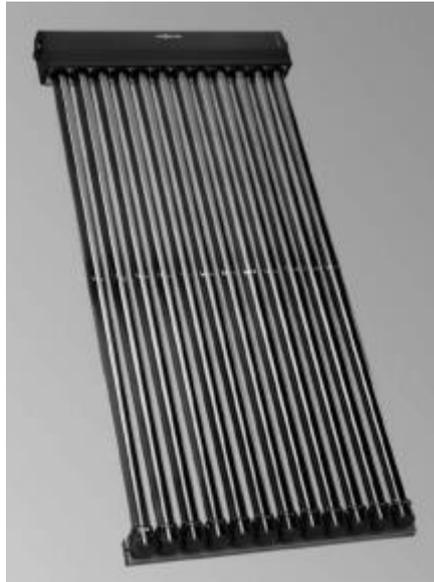
## **Capítulo 6. Especificación de los componentes de la nueva instalación**

### **6.1 Especificación técnica de los componentes de la instalación.**

#### **6.1.1 Colectores solares de tubos de vacío.**

Un punto importante a llevar a cabo, será la selección del tipo y modelo de colector solar, puesto que ésta será la base de toda la instalación e influirá en todos los parámetros a elegir. La decisión vendrá determinada por las características del equipo, siendo muy importante el rendimiento del colector solar, característica importante que se debe tener en cuenta a la hora de la selección.

Según el estudio realizado, se ha decidido utilizar para nuestra instalación el colector solar de tubos de vacío modelo Vitosol 300-TM de la marca Viessmann. Es un tipo de colector solar que aprovecha la energía solar térmica, formado por colectores lineales alojados en tubos de vidrio al vacío. El panel tiene estructura de peine, con un mástil que conduce el fluido caloportador, y una serie de tubos a modo de púas donde se produce la captación de la radiación solar.



**Figura 40.** Colector solar de tubos de vacío modelo Vitosol 300-TM, Viessmann

El objetivo de diseño de estos equipos, de introducción en el mercado mucho más reciente, es la reducción de las pérdidas térmicas por conducción y convección entre el absorbedor y la cubierta de vidrio. Para ello, se realiza el vacío en el espacio entre ambos tubos, siendo las pérdidas térmicas dependientes del grado de vacío aplicado.

Esta tecnología de colectores solares emplea un mecanismo denominado heat pipe (tubo de calor). Este mecanismo consiste en un tubo cerrado, en el cual se introduce un fluido de propiedades específicas. Cuando el Sol incide sobre el absorbedor adosado al tubo, el fluido se evapora y absorbe calor (calor latente). El gas asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo donde se sitúa el foco frío. Allí se licua (condensa), y cede su calor latente al fluido que nos interesa calentar volviendo a caer al fondo del tubo por gravedad (Figura 42). Este proceso se repite mientras dure la radiación del Sol o hasta que el colector ha alcanzado una temperatura muy alta (en torno los 130°).

Datos técnicos		1,25 m <sup>2</sup> HW	1,51 m <sup>2</sup>	3,03 m <sup>2</sup>
Modelo SP3C				
Número de total:		10	12	24
Superficie bruta	m <sup>2</sup>	1,98	2,36	4,61
Superficie de absorción	m <sup>2</sup>	1,25	1,51	3,03
Superficie de apertura	m <sup>2</sup>	1,33	1,60	3,19
<b>Dimensiones</b>				
Anchura a	mm	885	1052	2060
Altura b	mm	2244	2244	2244
Profundidad c	mm	150	150	150
Los siguientes valores hacen referencia a la superficie de apertura:				
- Rendimiento óptico	%	75,0	75,2	74,0
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K)	1,432	1,906	1,668
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0,025	0,006	0,007
Los siguientes valores hacen referencia a la superficie total:				
- Rendimiento óptico	%	50,4	51,0	51,4
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K)	0,962	1,292	1,158
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0,017	0,004	0,005
Capacidad térmica	kJ/(m <sup>2</sup> · K)	4,20	3,98	6,34
Peso	kg	33	39	79
Volumen de líquido (medio portador de calor)	Litros	0,75	0,87	1,55
Presión de servicio admisible	bar/MPa	6/0,6	6/0,6	6/0,6
Durante la instalación de una válvula de seguridad de 8 bar (accesorio)	bar/MPa	8/0,8	8/0,8	8/0,8
Temperatura máx. de inactividad	°C	155	155	155
Capacidad de producción de vapor	W/m <sup>2</sup>	0	0	0
Conexión	Ø mm	22	22	22
<b>Datos técnicos para determinar la clase de eficiencia energética (etiqueta ErP)</b>				
Modelo SP3C		1,25 m <sup>2</sup> HW	1,51 m <sup>2</sup>	3,03 m <sup>2</sup>
Superficie total:	m <sup>2</sup>	1,33	2,36	4,61
Los siguientes valores hacen referencia a la superficie de apertura:				
- Rendimiento del colector $\eta_{tot}$ , con una diferencia de temperatura de 40 K	%	43	45	46
Rendimiento óptico	%	49,9	50,4	51,3
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K)	0,96	1,29	1,16
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0,017	0,004	0,005
Factor de corrección de ángulo IAM		1,02	1,02	1,03

Figura 41. Características técnicas Vitosol 300-TM



Figura 42. Funcionamiento del heat pipe.

Su funcionamiento se basa en cuatro etapas (Figura 42):

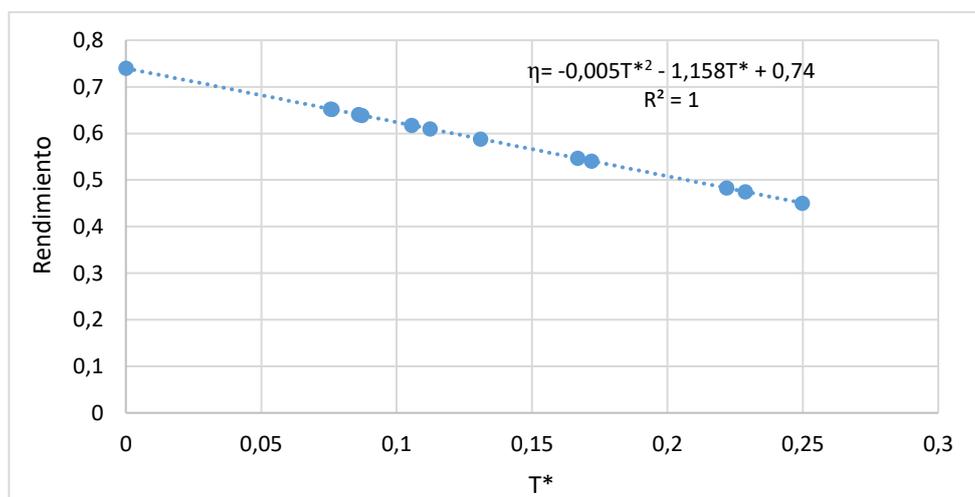
- 1) La radiación solar incide en el absorbedor que se calienta y transmite ese calor al tubo.
- 2) el calor recibido provoca que el fluido en el interior del tubo se evapore y ascienda por tanto energía (calor latente)
- 3) El fluido evaporado cede su calor latente al fluido más frío que circula por el exterior de la cabeza del tubo y al hacerlo se licua
- 4) El fluido de nuevo en estado líquido cae por gravedad al fondo del tubo para reiniciar el proceso.

La superficie de captación es elegida dependiendo de la demanda de ACS de la ubicación donde se vaya a colocar. Como en nuestro caso es una instalación experimental nos valdrá una superficie que logre calentar todo el caudal que pase por el captador a la temperatura de trabajo. Tiene que ser de alta absorción térmica para almacenar gran parte de la energía disponible y unos coeficientes de pérdidas de poco valor.

La relación entre la totalidad de radiación recibida y el aprovechamiento efectivo transmitido al absorbedor del captador solar constituye la eficiencia del colector solar ( $\eta$ ).

$$\eta = \eta_0 - K_1 \times T^* - K_2 \times T^{*2}$$

$$T^* = \frac{T_{fluido} - T_{amb}}{I}$$



**Figura 43.** Curva de rendimiento Vitosol 300-TM

El número de colectores que se instalaran, también juega un papel importante ya que, dependiendo de ello, se podrá captar más energía o menos llevando consigo la determinación de otros parámetros de la instalación, como puede ser el caudal de trabajo, kg de PCM, el número de acumuladores... Nuestra instalación cuenta con 4 colectores solares de tubos de vacío (Figura 34), dispuestos en parejas de dos colectores cada uno, cuyas disposiciones pueden ser en serie o en paralelo.

### 6.1.2 Bomba del primario y secundario.

A la hora de determinar el grupo de bombeo para la parte del circuito principal, hay que determinar de antemano las pérdidas producidas por todos los componentes de la instalación, para así determinar de una manera correcta un grupo de bombeo capaz de vencer las pérdidas producidas por los elementos que componen el circuito primario.

Como los caudales para el proceso de carga y descarga, que se desarrollaran en el circuito primario, serán de rangos distintos, se seleccionarán dos tipos distintos de bombas para que cumplan los requisitos de los dos procesos comentados.

Para el proceso de carga, se ha optado por elegir el modelo MKX-1935-1-6 de la marca SAER (Figura 44). Es una bomba centrífuga multietapa de eje vertical, preferible para trabajar en situaciones donde se requieran altas presiones. Las conexiones de aspiración y descarga de la bomba están en línea, lo cual hace la bomba fácil de instalar. La unidad hidráulica es accionada mediante un motor eléctrico colocado en lo alto de la bomba, fabricada toda ella en acero inoxidable (los cálculos para su selección se muestran en el punto 6.2.2).

#### CARACTERÍSTICAS:

- Cuerpo Asp/Imp:	Inox-304
- Cuerpo de bomba:	Inox-304
- Difusor:	Inox-304
- Impulsor:	Inox-304
- Cierre:	Grafito/Silicio
- Eje:	Inox-303
- Aislamiento:	F
- Protección:	IP55
- T° Max. Líquido [°C]:	110
- T° máx. Ambiente [°C]:	40
- Caudal máx. [m³/h]:	240
- Altura máx. [m]:	305
- Bajo demanda en Inox-316.	



## MODELO/CARACTERÍSTICAS

Tipo	P2 Nominal		Intensidad [A]		m³/h l/min	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
	kW	HP	1x230	3x400		6,6	10	13,3	16,6	20	23,3	26,6	30	33,3
MKX-1395 1-2	0,37	0,5	2,75	0,97		13	12,5	12	11,5	11	10,5	10	9,5	9
MKX-1395 1-3	0,37	0,5	2,75	0,97		19	18	17,5	17	16,5	16	15	14	12
MKX-1395 1-4	0,37	0,5	2,75	0,97		24	23,5	23	22,5	21,5	21	19	18	16
MKX-1395 1-5	0,37	0,5	2,75	0,97		30	29,6	29	28	27	26	24	22	20
MKX-1395 1-6	0,37	0,5	2,75	0,97		36	35,5	35	33,5	33	31	28	26	23
MKX-1395 1-7	0,37	0,5	2,75	0,97		42	41	40,5	39	38	36	33	30	27
MKX-1395 1-8	0,55	0,75	3,5	1,3		48	47	46	45	43	41	38	34	30
MKX-1395 1-9	0,55	0,75	3,5	1,3		54	53	52	51	49	46	43	39	33

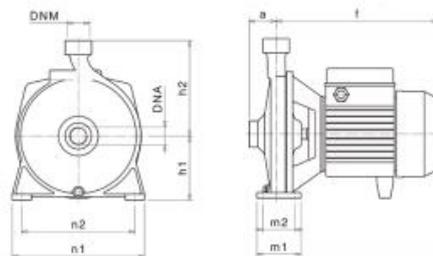
**Figura 44.** Modelo MKX-1395-1-6, marca SAER

Para el proceso de descarga, se ha seleccionado la bomba de la marca SAER modelo CMP 76 (Figura 45). Esta serie de electrobombas centrifugas con turbina cuenta con una entrada axial y una salida radial. En su recorrido transforma a energía cinética por en energía de presión, saliendo de ésta con una mayor presión.

Esta bomba cumplirá tanto los caudales que se suministran en el proceso (20 l/min y 40 l/min), además de estar dimensionada para vencer las pérdidas que tendrá la instalación.

### CARACTERÍSTICAS:

- Cuerpo de bomba: Fundición
- Impulsor: Resina termoplástica
- Eje: Bajo demanda en latón
- Cierre mecánico: Inox Aisi-431
- Protección motor: Carbón / Cerámica
- Tensión estándar: IP 44
- Caudal máx. [m3/h]: Bajo demanda IP 55
- Altura máx. [m]: 1x230V-50Hz
- Presión máx. funcionamiento [bar]: 3x230V/400V
- T° máx. Fluido [°C]: 8
- T° máx. Ambiente [°C]: 59
- Aspiración máx. [m]: -15 / +70
- Instalación: +40
- Instalación: 7 con válvula de pie
- Instalación: Vertical / Horizontal



Tipo Type Typ	Alimentazione Feeding - Alimentacion Alimentation - Speisung 50 Hz	P1 Max kW	P2 Nominale P2 Nominal		Corrente assorbita - A Absorbed current - A Corriente absorbida - A Courant absorbe - A Abgenommener Strom - A	— — —		U.S. g.p.m.	0	5,3	10,5	13,2	15,8	21,1	26,4	31,7	35,2	
			kW	HP		μF	V		m³/h	0	1,2	2,4	3	3,6	4,8	6	7,2	8
									l/min	0	20	40	50	60	80	100	120	133
CMP	1 x 230 V	0,65	0,37	0,5	3	10	450		24	22	20	19	17	16				
CMP	3 x 230-400 V	0,55	0,37	0,5	2,5/1,4				24	22	20	19	17	16				
CMP 76	1 x 230 V	1	0,55	0,75	4,5	16	450		30	29	28	27	26	23,7	21			
CMP 76	3 x 230-400 V	0,76	0,55	0,75	3,2/1,8				30	29	28	27	26	23,7	21			
CMP 79	1 x 230 V	1,25	0,75	1	6	20	450	H (m)	35	33	32	31	30	28	26			
CMP 79	3 x 230-400 V	1,05	0,75	1	4,7/2,7				35	33	32	31	30	28	26			
CM 1	1 x 230 V	1,9	1,1	1,5	9	31,5	450		44	42	39,5	38	36,5	33,5	30	21		
CM 1	3 x 230-400 V	1,87	1,1	1,5	6/3,5				44	42	39,5	38	36,5	33,5	30	21		
CM 1B	1 x 230 V	2,5	1,6	2,2	10,6	40	450		52	50	47	46	44,5	41	37	32		
CM 1B	3 x 230-400 V	2,1	1,6	2,2	8,3/4,8				52	50	47	46	44,5	41	37	32		
CM 1C	1 x 230 V	3,08	2,2	3	13,7	50	450		59	57	54,5	53,5	52	48,5	45	39	35	
CM 1C	3 x 230-400 V	2,8	2,2	3	9,7/5,6				59	57	54,5	53,5	52	48,5	45	39	35	

Figura 45. Características técnicas bomba SAER CMP 76

### 6.1.3 Vaso de expansión.

El vaso de expansión es un elemento indispensable para la seguridad de la instalación, su función es absorber la sobrepresión que se produce al aumentar la temperatura el fluido.

Según el código técnico de la edificación CTE, los vasos de expansión cerrados deben estar dimensionados de tal forma que, si se producen condiciones de estancamiento en la instalación, se debe tener en cuenta que el vaso de expansión tenga la capacidad suficiente para compensar la dilatación de todo el fluido contenido en los colectores y las tuberías de conexión, más un factor de seguridad del 10%. Este volumen será el denominado volumen desplazado por ebullición.

Además del volumen anterior, se tiene que tener en cuenta que el volumen de reserva, que es normalmente entre el 1-3% del volumen total de la instalación, este volumen evitará que nuestro circuito se despresurice.

En nuestro caso el vaso de expansión ha sido calculado según la norma UNE-100-155 2004 Cálculos de sistema de expansión



Figura 46. Vaso de expansión

En la Figura 46, se muestra el vaso de expansión elegido para nuestra instalación, de un volumen útil total de 21 litros. Se colocará según lo recomienda el RITE, en la aspiración del grupo de bombeo del circuito principal.

#### **6.1.4 Intercambiador de placas termosoldadas.**

Para el intercambio de calor del circuito primario al secundario se ha elegido usar un intercambiador de placas termosoldadas, marca Ciapriani modelo 2A14-10. Están compuestos por diez placas de acero inoxidable, soldadas térmicamente entre sí, de manera que forman dos sistemas de canales completamente separados. Eliminan la necesidad de juntas y elementos de estanqueidad. Las placas son corrugadas para favorecer a la turbulencia del flujo, mejorando la transferencia de calor entre los fluidos. Presentan reducidas dimensiones y bajo peso, facilitándose así su instalación.

La dirección de los fluidos, en este caso agua, en este tipo de intercambiador es paralelo y a contracorriente. Los canales que se forman entre las placas corrugadas están dispuestos de modo que los fluidos fluyan a través de canales alternos, siempre en sentido opuesto.



**Figura 47.** Intercambiador placas termosoldables Cipriani, 2A14-10.



**Figura 48.** Detalle intercambiador de placas termosoldables.

El fluido caliente entra por el orificio superior derecho, este pasa a través de las placas disminuyendo su temperatura debido al flujo en contracorriente del fluido refrigerante, cuya entrada es la inferior izquierda. El fluido caliente, con valores de temperatura menores, sale del intercambiador por la salida inferior derecha, con temperaturas idóneas para el circuito primario.



**Figura 49.** Direcciones de flujo del fluido caliente y frío.

### 6.1.5. Chiller

La enfriadora o “chiller” debe de ser capaz de enfriar el fluido del sistema secundario a condiciones de entrada en el intercambiador de placas, para que funcione de manera óptima. Es por ello, que tiene que tener una potencia adecuada para satisfacer las necesidades de la totalidad del caudal secundario.

Se hará uso de la enfriadora que tenemos disponible de la instalación anterior de la UPCT, concéntrate se tratará del modelo 30RA009 de la marca Carrier. Enfriadoras de agua de condensación por aire, con compresores scroll, ventiladores axiales de dos velocidades y bajo nivel sonoro, intercambiador refrigerante-agua de placas de acero

inoxidable soldado, control numérico PRO-DIALOG Plus y módulo hidráulico completo.  
Fabricada según normas C.E y certificaciones ISO-9001.



Figura 50. Enfriadora Carrier 30RA009

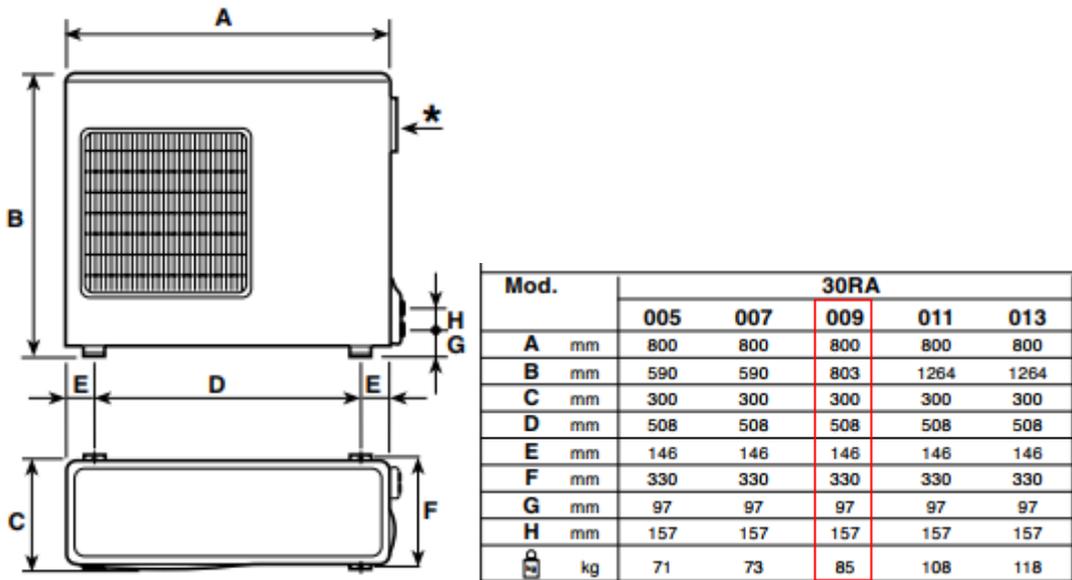


Figura 51. Dimensiones y peso enfriadora 30RA009

Unit		005	007	30RA	011	013	005	007	30RH	011	013	
				009					009			
Power input	Cooling	kW	2.07	2.70	3.05	3.22	4.57	2.02	2.57	2.95	3.28	4.56
	Heating	kW	-	-	-	-	-	2.24	2.93	3.4	3.72	5.03
Compressor type			SCROLL									
Water circulating pump selectable speeds	No.	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Propeller fan motor - diameter	No./mm	1/370	1/370	1/370	2/370	2/370	1/370	1/370	1/370	2/370	2/370	
Speed	rpm	840	1090	1030	1030	1030	890	1050	1200	1050	1200	
Heat exchanger			WELDED PLATES									
Water content	l	0.66	0.85	0.94	1.22	1.50	0.66	0.85	0.94	1.22	1.50	
Expansion tank capacity	l	1	1	2	2	2	1	2	3	3	3	
Nitrogen charge pressure	kPa	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
Expansion device	#	0.043	0.052	0.058	0.061	0.065	0.046/0.042	0.055/0.046	0.054/0.047	0.062/0.055	0.065/0.060	

Figura 52. Datos técnicos

### 6.1.6. Tubería y aislamiento.

La red de tuberías de la instalación será de tubería de cobre rígido, resistencia a la corrosión, resistencia a presiones y temperaturas elevadas. Idóneo para aplicaciones donde el agua es el fluido principal, ofreciendo gran seguridad y durabilidad.



**Figura 53.** Tubería y accesorios de cobre

El diámetro para toda la instalación será de 25 mm de diámetro, haciendo uso de reducciones para la conexión con los equipos que forman el sistema. Además, se utilizará T y codos para distribuir el sistema como se tiene diseñado.

Para evitar y disminuir las pérdidas de calor a lo largo del circuito hidráulico, se forrará con aislamiento flexible Armaflex, con polímero poliolefina plástico blanco incorporado que le confiere excelentes propiedades mecánicas y una buena resistencia a la intemperie y radiaciones solares. Está especialmente diseñado para su instalación en sistemas calefacción, ventilación, aire acondicionado e instalaciones solares.



**Figura 54.** Aislamiento flexible Armaflex

## 6.2 Caracterización experimental de componentes.

### 6.2.1 Válvulas de regulación y control.

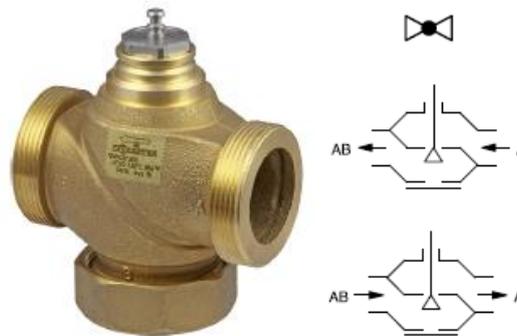
#### 6.2.1.1 Descripción

Las válvulas son dispositivos mecánicos que servirán para la regulación y distribución del fluido a lo largo de la instalación. Al estar colocados en puntos determinados de las

tuberías, se tiene el control tanto de la velocidad como la cantidad del fluido que pasa a través de ellas.

En nuestra instalación, se van a utilizar válvulas de tipo asiento (Figura 55). Formadas por, un orificio redondo, y un obturador cónico colocado en el extremo de una varilla, llamada vástago y el asiento, posición final que alcanza el obturador. A medida que el elemento de cierre se aproxima al asiento, la sección de paso se reduce y, por tanto, disminuye el caudal. En la válvula de tres vías, el avance del vástago abre o cierra la entrada/as o salida/as que tiene dicho elemento.

Las válvulas a estudio serán de dos vías y tres vías, pudiendo ser éstas últimas divisoras o de control (Figura 56). La función de la válvula de dos vías será la de regular el caudal a lo largo de los tramos de tubería que forman la instalación, en nuestro caso, se trata del modelo VUN 025 F300 de la marca SAUTER.



### Technical data

#### Parameters

Nominal pressure	16 bar
Control ratio	> 50:1
Valve characteristic	F200 = linear F3*0 = equal percentage
Nominal stroke	8 mm
Leakage rate	≤ 0.02% of $K_{VS}$ value

#### Ambient conditions

Operating temperature <sup>1)</sup>	-15...150 °C
Operating pressure up to 120 °C	16 bar
Operating pressure up to 130 °C	13 bar
Operating pressure up to 150 °C	10 bar

**Figura 55.** Válvula de dos vías Sauter VUN025F300.

Por otro lado, la válvula de tres vías nos permitirá disponer de dos funciones, divisora y de control, como ya hemos dicho anteriormente. La primera función, como el mismo nombre indica dividirá el caudal por sus dos salidas. Y en la segunda, la válvula dispondrá

de dos entradas y una única salida, uniendo los caudales de entrada. La válvula a estudio es el modelo BUN025F300 de la marca SAUTER.



### Technical data

Parameters	
Nominal pressure	16 bar
Valve characteristic, control passage	F200 = linear F3*0 = equal percentage
Valve characteristic, mixing passage	Linear
Control ratio	> 50:1
Leakage rate, control passage	≤ 0.05% of $k_{VS}$ value
Leakage rate, mixing passage	≤ 1% of $K_{VS}$ value
Nominal stroke	8 mm
Ambient conditions	
Operating temperature <sup>1)</sup>	-15...150 °C
Operating pressure up to 120 °C	16 bar
Operating pressure up to 130 °C	13 bar
Operating pressure up to 150 °C	10 bar

**Figura 56.** Válvula de tres vías Sauter BUN025F300

Dispondremos de actuadores que estarán acoplados a las válvulas para controlar el movimiento del vástago, elemento que interviene en la apertura o cierre de las válvulas, según la tensión aplicada. El actuador, para la válvula de dos vías como para la de tres en función de control, será el modelo AVM105SF132 de la marca SAUTER. Sin embargo, para la función divisora de la válvula de tres vías se hará uso del modelo AVM321SF132 de la misma marca. Ambos, tienen diferentes modos de apertura de acuerdo al código de switches marcados. Para este caso, se elige la apertura lineal según la disposición que se muestra en la Figura 57.



Desired character. curve	Switch coding	Characteristic curve for valve	Characteristic curve for drive	Effective on valve
Equal percentage	1 2 3 On Off			
Linear	1 2 3 On Off			
Linear	1 2 3 On Off			
	= factory setting			



AVM32\*SF132

Coding switch

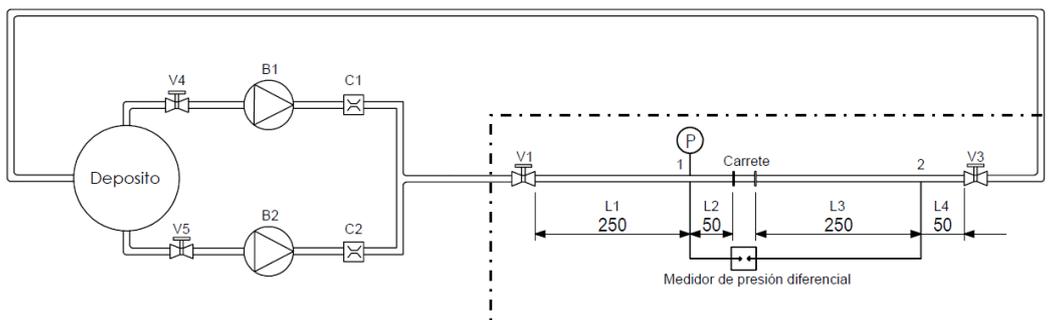
de Schaltsstellung fr Position du commutateur en Switch position it Posizione dell'interruttore es Posición del interruptor sv Förställning nl Schakelaarstand	de Schaltzeit fr Temps de positionnement en Positioning time it tempo di manovra es tiempo de ajuste sv ställtid nl stemp	de Weisung fr Sens d'action en Direction of operation it Direzione dell'azione es Sentido de mando sv Driftledning nl Waargevochtig	de Kammer-Armee* fr Cuvée caractéristique du servomoteur en Actuator characteristic it Curva caratteristica attuatore es Curva característica del motor sv Korns, styrning nl Motorbestuur	de Stellung** fr Signal de positionnement en Positioning signal it Segnale di regolazione es Señal de mando sv Styrsignal nl Stuursignaal	de Zwangsbearbeitung fr Commande forcée en Forcéd operation it Comando forzato es Mando desordenado sv Tvångsstyrd ventil nl Dwangbesturing	de Schließpunkt Zwangsbearbeitung** fr Point de fermeture de la commande forcée en Closing point for forced operation it Comando forzato punto di sblocco es Punto de cierre del mando desordenado sv Stängningspunkt, tvångsstyrd nl Sluitpunt dwangbesturing
1 2 3 4 5 6 On Off	AVM321: 12 s/min AVM322: 6 s/min			DC 0...10 V	prf. off	
1 2 3 4 5 6 On Off	AVM321: 4 s/min AVM322: 4 s/min					
1 2 3 4 5 6 On Off						
1 2 3 4 5 6 On Off						

Figura 57. Actuadores y modos de apertura

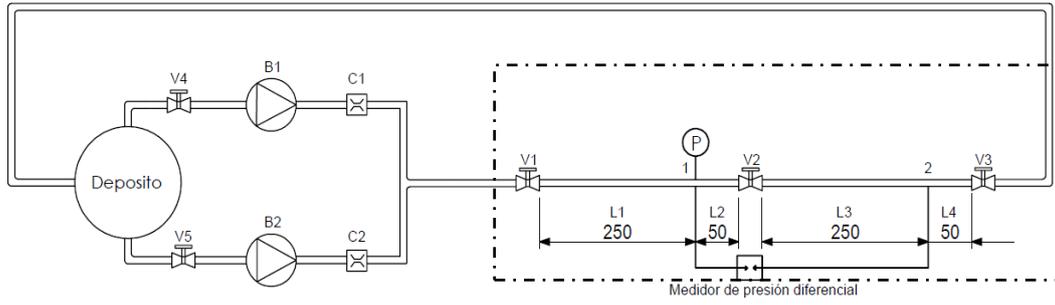
6.2.1.2. Estudio experimental

Para las válvulas seleccionadas, se desarrolla un estudio experimental para definir el coeficiente de pérdidas de presión en función de la tensión aplicada al actuador acoplada a la válvula, datos a tener en cuenta para el cálculo hidráulico de los grupos de bombeo de la instalación.

Para ello, se va a disponer de dos instalaciones experimentales, una para el ensayo de la válvula de dos vías y la otra, para la de tres, según la Norma UNE-EN 1267:2012. El ensayo, montaje y toma de datos, se llevará a cabo según lo dispuesto en el Anexo I. En la Figura 58 se muestra el esquema del circuito de ensayo para la válvula de dos vías y en la Figura 59 para el caso de la válvula de tres vías, para sus funciones divisora y de control.

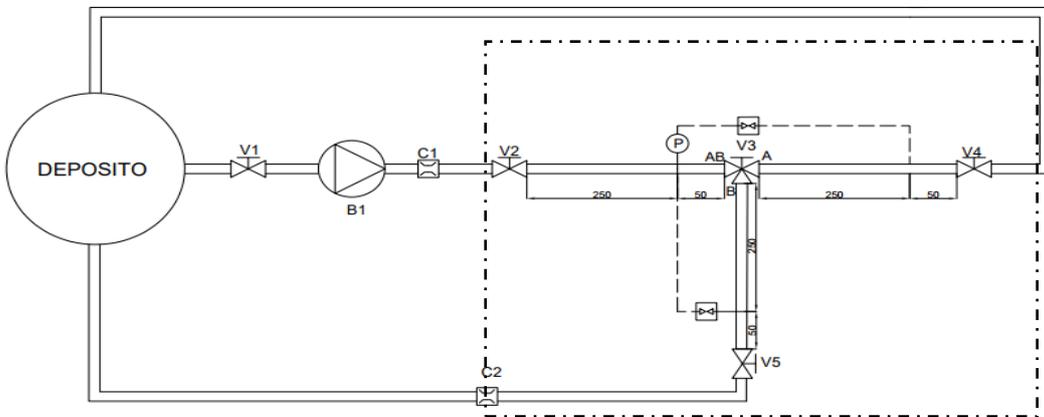


a)

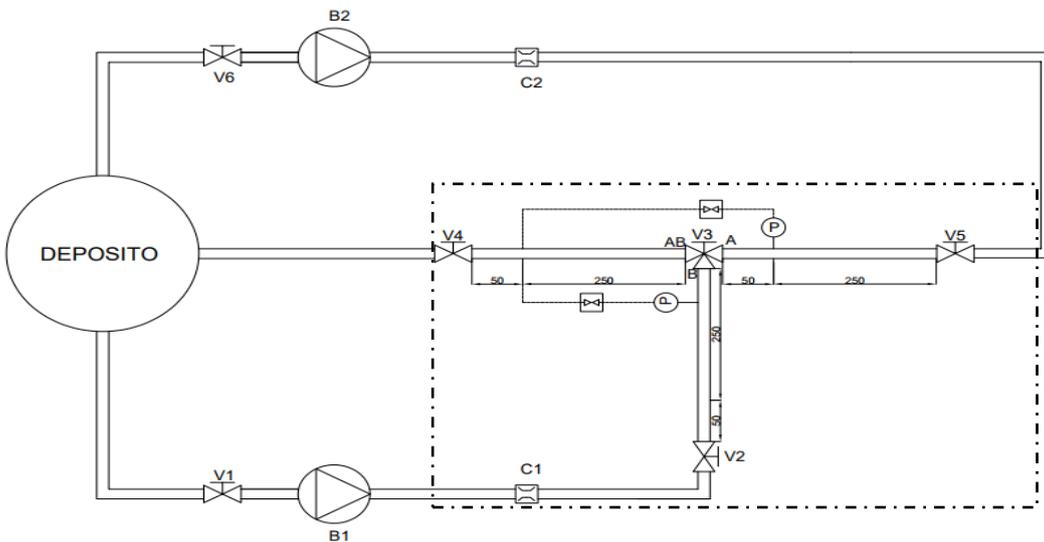


b)

**Figura 58.** Instalación para la caracterización experimental del coeficiente de caudal de válvula dos vías, según la norma UNE-EN: 1267:2012. a) Montaje previo sin válvula b) Montaje con válvula a ensayar.



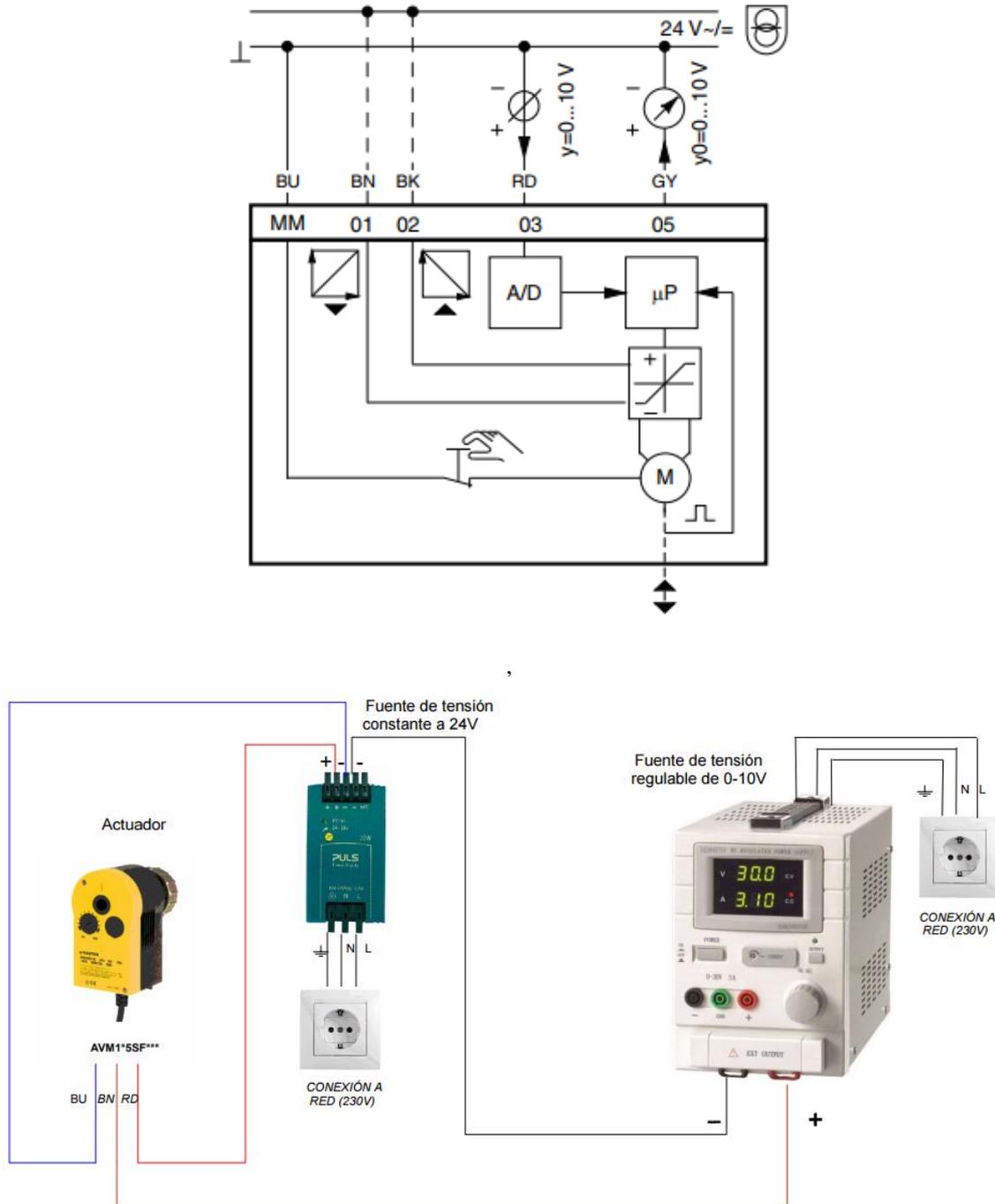
a)



b)

**Figura 59.** Instalación para la caracterización experimental del coeficiente de caudal de válvula tres vías, según la norma UNE-EN: 1267:2012. a) Modo divisor b) Modo control.

Para el conexionado eléctrico del actuador, se procederá siguiendo el esquema que se muestra en la Figura 60, tanto para la válvula de dos y la de tres vías. Hará falta disponer de dos fuentes de tensión, una para regular el movimiento del actuador (fuente de tensión 0-10VDC regulable), y otra fuente de tensión de 24VDC constantes.



**Figura 60.** Conexionado eléctrico actuador-válvula.

El cable rojo (RD) del actuador ira a para al polo positivo de la fuente de 24VDC, el cable marrón (BN) se conectará al polo positivo de la fuente de tensión variable, y el azul

(BU) al polo negativo de la fuente fija. La última conexión se realizará entre el polo negativo de ambas fuentes.

Una vez definido el sistema experimental y realizado la toma de datos, se procederán a los cálculos. Se basarán en definir el coeficiente de caudal de la válvula  $k_v$  y el coeficiente de resistencia al flujo  $\xi$  para determinados caudales, aplicando una tensión de entrada diferente, viendo así la variación que se produce en estas dos variables en función de la tensión aplicada.

$$\xi = f(V)$$

$$k_v = f(V)$$

El coeficiente de resistencia al flujo de la válvula (adimensional) es la pérdida de presión en la válvula, adimensionalizada con la presión dinámica (todas las variables se expresan en unidades del SI).

$$\xi = \frac{2\Delta p_v}{\rho U^2} = \frac{\pi^2 \Delta p_v D^4}{8 \rho Q^2}$$

El coeficiente de caudal de la válvula  $k_v$  (dimensional, en m<sup>3</sup>/h - bar) vendrá determinado por la siguiente ecuación

$$k_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_v \rho_0}}$$

Siendo  $\Delta p_v = \Delta p_{v+t} - \Delta p_t$ , expresiones del tipo cuadrático de la forma

$$\Delta p_t = aQ^2$$

$$\Delta p_{v+t} = bQ^2$$

Por otro lado, la densidad del agua es función de la temperatura del agua. Para el rango de temperaturas (en °C entre 0 y 50) de ensayo se puede utilizar la siguiente correlación.

$$\rho = 1000,142857 + 0,0042857 t - 0,005 t^2$$

Por último, definimos  $\rho_0$  como la densidad del agua a temperatura de 15°.

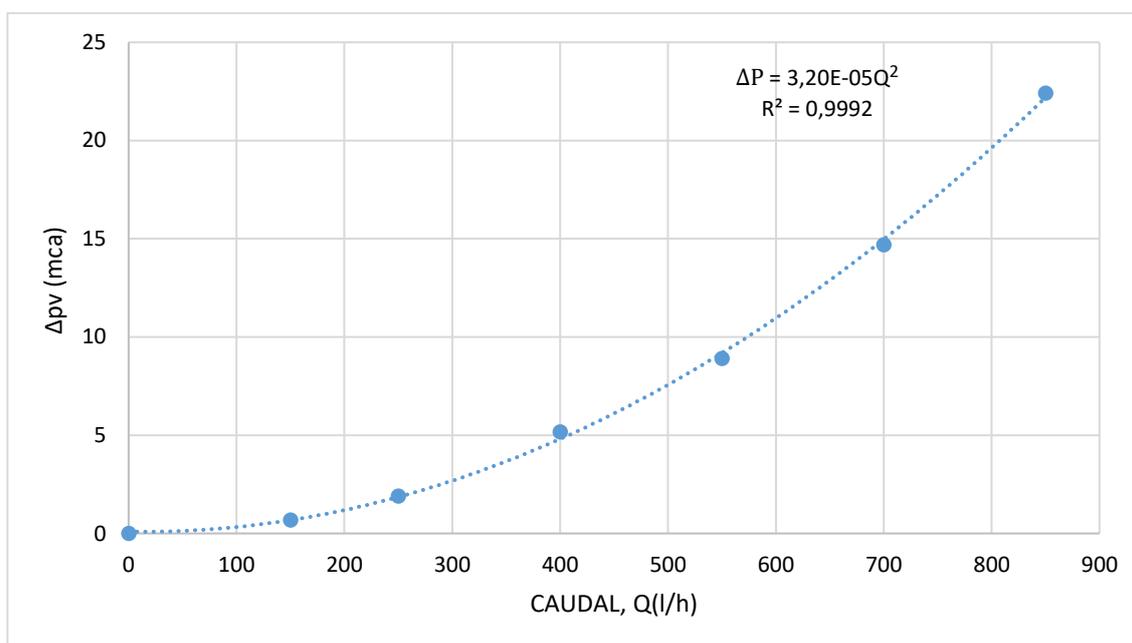
### 6.2.1.3. Resultados obtenidos

#### 6.2.1.3.1. Válvula de dos vías

Se muestran los resultados obtenidos para las tensiones que se van aplicar en el actuador de la válvula de dos vías, donde los 10V nos da la apertura completa y 5V la mitad.

Q (l/h)	$\Delta p_t$ (mca)	$\Delta p_{v+t}$ (mca)	$\Delta p_v$ (mca)	$\xi$	Kv (m <sup>3</sup> /h - bar)
900	0,080	21,350	21,270	0,447	0,623
700	0,060	13,650	13,590	0,472	0,606
500	0,030	6,420	6,390	0,435	0,631
350	0,030	3,310	3,280	0,456	0,616
250	0,020	1,590	1,570	0,428	0,636
150	0,020	0,580	0,560	0,424	0,639

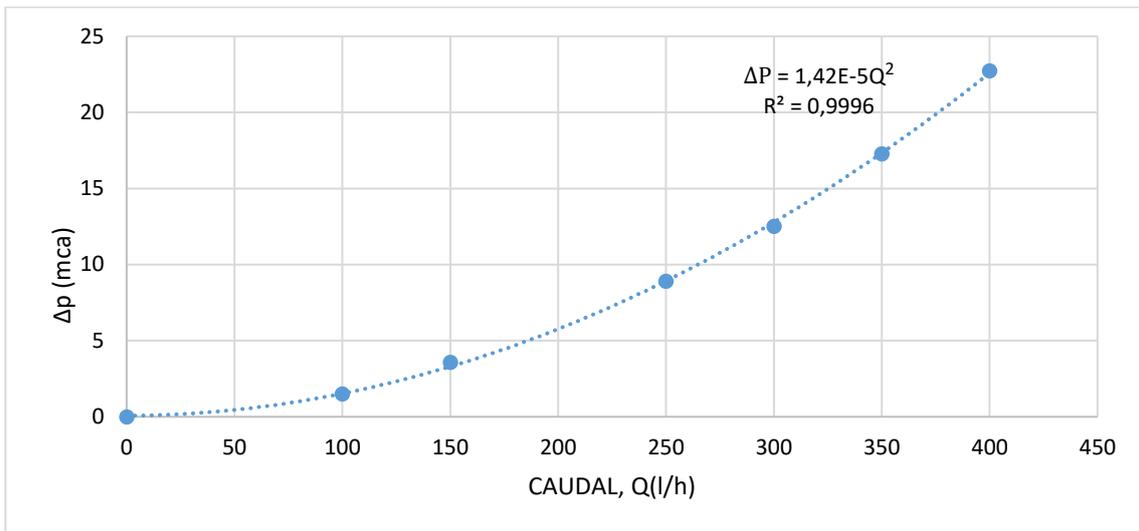
**Tabla 14.** Tabla de resultados a tensión 10 V, válvula 2 vías.



**Figura 61.** Pérdida de presión en función del caudal para 10V, válvula 2 vías.

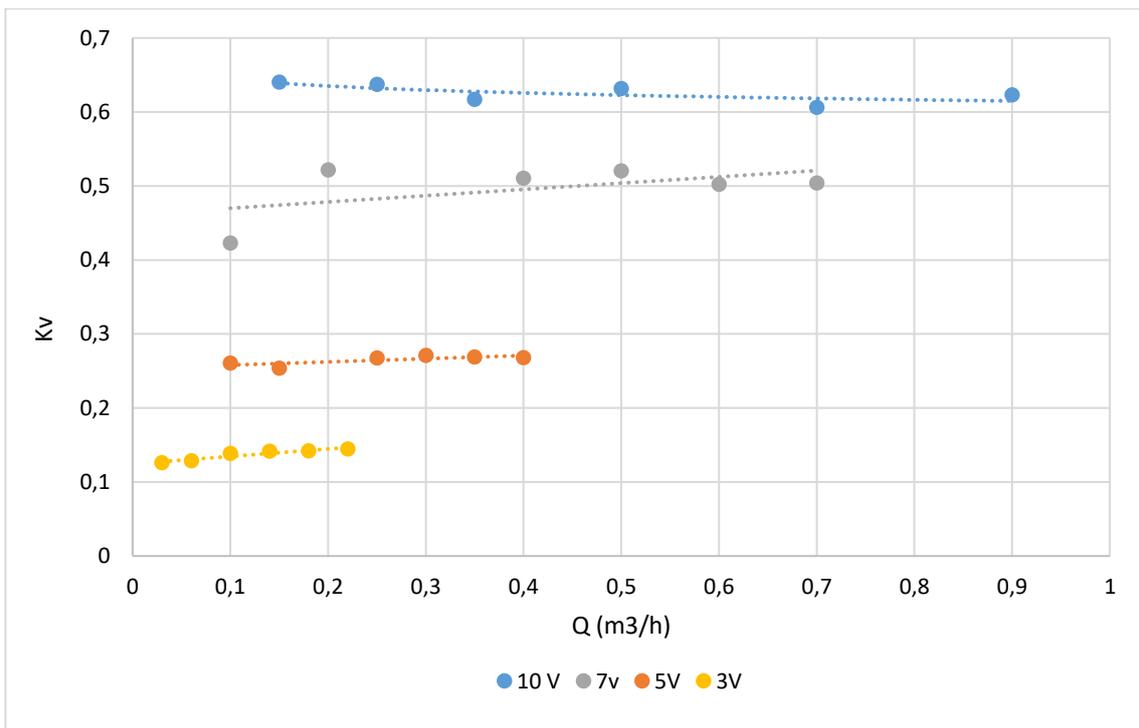
Q (l/h)	$\Delta p_t$ (mca)	$\Delta p_{v+t}$ (mca)	$\Delta p_v$ (mca)	$\xi$	k <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> /h - bar)
400	0,030	22,770	22,740	2,422	0,267
350	0,030	17,310	17,280	2,403	0,268
300	0,020	12,540	12,520	2,370	0,270
250	0,020	8,930	8,910	2,429	0,267
150	0,020	3,590	3,570	2,703	0,253
100	0,010	1,510	1,500	2,556	0,260

**Tabla 15.** Tabla de resultados tensión 5V, válvula 2 vías.



**Figura 62.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 5V, válvula 2 vías

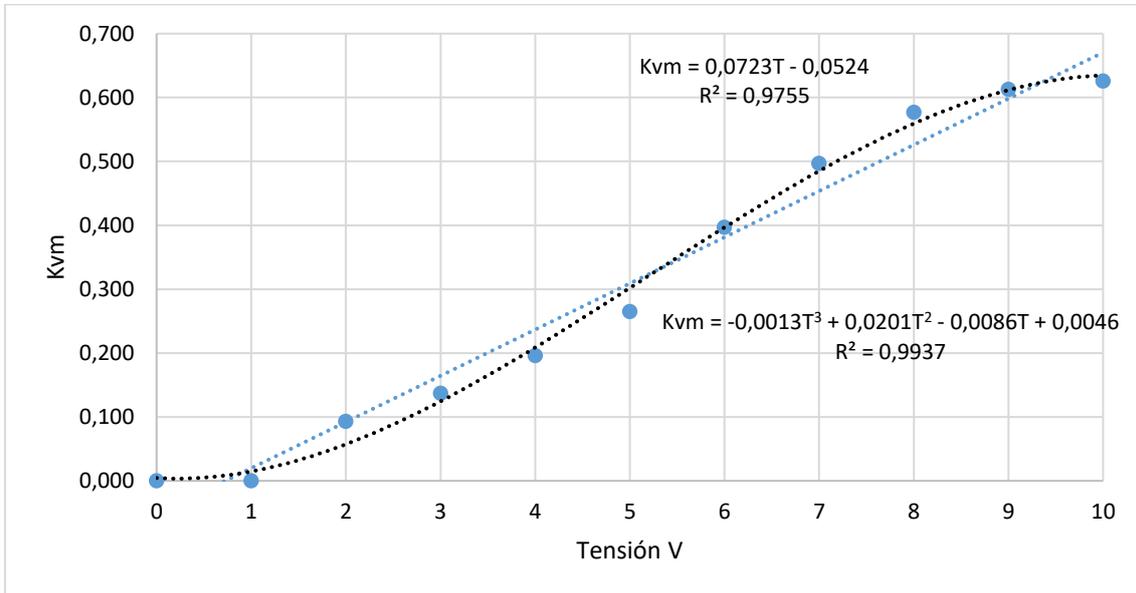
Podemos hacer una comparativa de la variación del coeficiente de caudal  $k_v$  en función de las tensiones que se han estudiado (0-10V). En la Figura 63, me muestra para varias tensiones elegidas, la variación del coeficiente de caudal  $k_v$  respecto al caudal que pasa a través de la válvula.



**Figura 63.** Coeficientes de caudal  $K_v$  en función de la tensión aplicada al actuador para válvula 2 vías.

Como observamos en la Figura 63, cuanto menor es la tensión aplicada, menor será el coeficiente de caudal  $k_v$  para un caudal determinado. Por ejemplo, para un caudal  $Q=0,2$  m<sup>3</sup>/h tenemos un  $k_v = 0,1$   $k_v = 0,65$  para tensiones de 3 y 10 voltios, respectivamente.

Asimismo, vemos una tendencia constante de los valores de la variable para cada una de las tensiones aplicadas. Es por ello, que podemos determinar un coeficiente de caudal medio,  $k_{vm}$  para cada tensión aplicada, pudiendo determinar su valor en función solamente de la tensión aplicada a la válvula, independientemente del caudal que circule por ella.



**Figura 64.** Coeficiente de caudal medio para cada tensión aplicada.

Tensión (V)	$k_v$ (m³/h - bar)
10	0,626
9	0,613
8	0,577
7	0,497
6	0,397
5	0,265
4	0,196
3	0,137
2	0,093
1	0
0	0

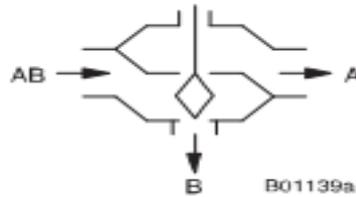
**Tabla 16.** Coeficientes de caudal medio

### 6.2.1.3.2 Válvulas de tres vías.

#### a) Función divisora.

En primer lugar, nos centraremos en la función divisora de caudal. Como su mismo nombre indica, divide por sus dos salidas (A y B), el caudal que entra por AB dependiendo de la tensión aplicada en el actuador. Así pues, para una tensión de 0V el obturador del

husillo está en su posición inicial bloqueando la salida del fluido por A. Al ir aumentado la tensión, el husillo se desplaza hacia B, llegando a su posición final a 10V, cuando permite solamente el paso del fluido por A.



**Figura 65.** Válvula de tres vías función divisora.

Cada una de las salidas tendrá su respectivo coeficiente de caudal  $k_v$  y coeficiente de resistencia al flujo  $\xi$ , siendo  $k_{vA}$ ,  $\xi_A$  para la salida A, y  $k_{vB}$ ,  $\xi_B$  para B.

Las tensiones a estudio en este caso han sido, 10V, 6.5V y 0V. Solo se permite el paso entre la entrada AB y la salida B, dejando bloqueado el paso por A. Así pues, los valores para la salida A serán  $k_{vA} = 0$  y  $\xi_A=0$ .

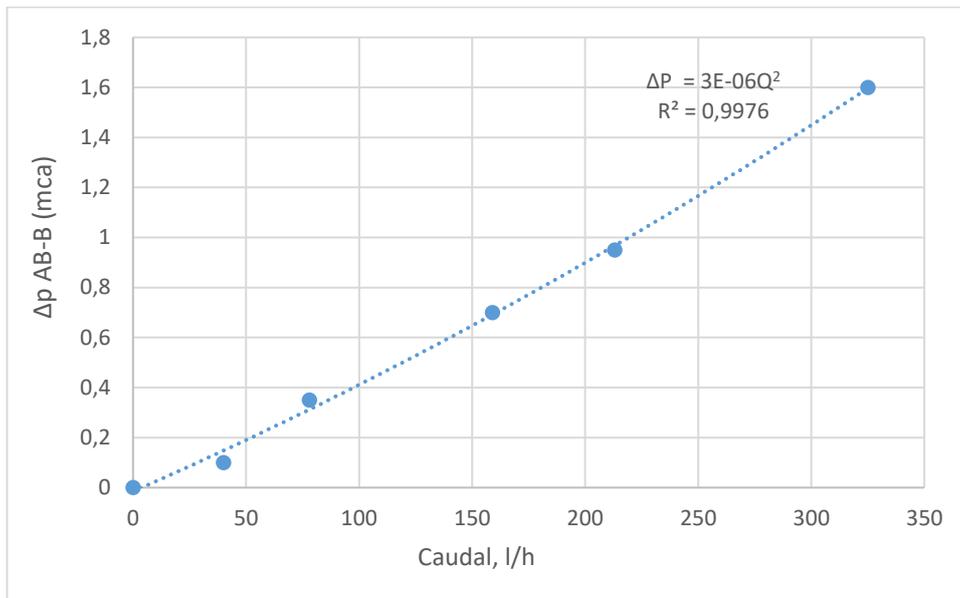
QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta P$ AB-A (mca)	$\Delta P$ AB-B (mca)	$\xi_B$	$k_{vB}$
325	0	325	2,100	1,600	0,258	0,820
213	0	213	1,350	0,950	0,357	0,698
159	0	159	1,100	0,700	0,472	0,607
78	0	78	0,750	0,350	0,980	0,421
40	0	40	0,650	0,100	1,065	0,404

**Tabla 17.** Tabla de resultados para tensión 0V, válvula 3 vías divisora

En la figura 66 se muestran los resultados para la tensión de 0V. Para los valores de  $k_{vB}$  y  $\xi_B$  no se puede estimar un valor promedio puesto que los valores tienen una dispersión alta, alejándose de su media. Es por ello, que obtenemos correlaciones lineales de estas variables en función del caudal de trabajo. Elegimos la forma lineal, puesto así lo determina la configuración de los swichts (Figura 57).

$$k_{vB} = 0,20 + 2,06 \times 10^{-3}Q \quad (1)$$

$$\xi_B = 1,13 - 3,10 \times 10^{-3}Q \quad (2)$$



**Figura 66.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 0V para AB-B, válvula 3 vías divisora.

Para una tensión de 6,5 V, el caudal de entrada se divide de manera equitativa entre sus dos salidas, A y B. En las figuras 67 y 68, se muestra las pérdidas de presión que se dan en las dos salidas de la válvula en función del caudal que pasa a través de ella. Los resultados nos evidencian una pérdida mayor en la salida A, en comparación con B, debido a que el fluido sufre mayor fricción en el recorrido AB-A en el interior de la válvula.

QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	ΔP AB-A (mca)	ΔP AB-B (mca)	ξ <sub>A</sub>	kv <sub>A</sub>	ξ <sub>B</sub>	kv <sub>B</sub>
318	164	164	10,200	3,800	6,463	0,164	2,408	0,269
210	108	102	5,150	1,900	7,524	0,152	3,112	0,236
156	81	75	3,300	1,200	8,571	0,142	3,636	0,219
80	43	37	1,150	0,750	10,599	0,128	9,224	0,136
50	34	16	0,750	0,350	11,056	0,125	16,642	0,102

**Tabla 18.** Tabla de resultados tensión 6,5V, válvula 3 vías divisora.

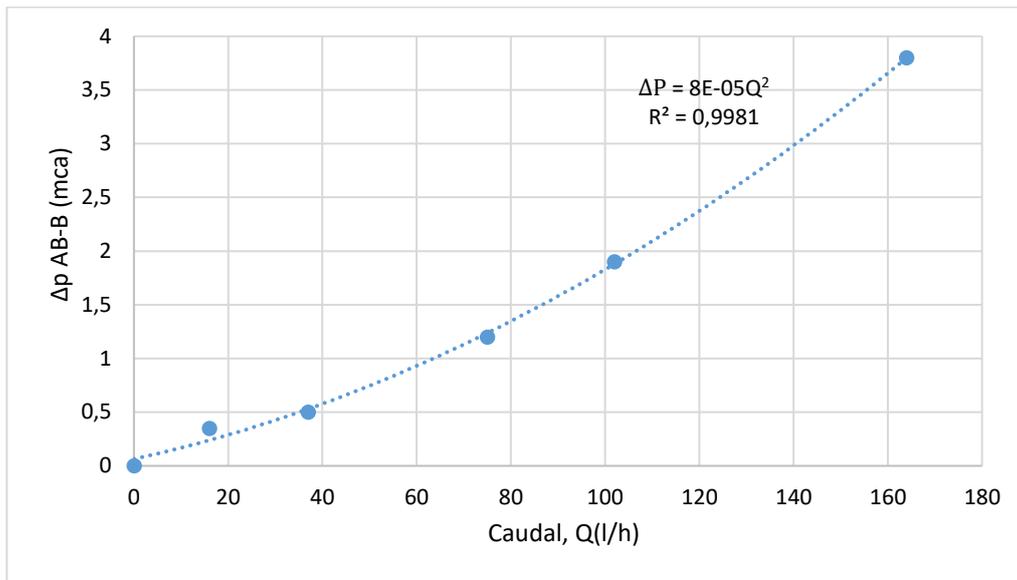
De igual manera que para el anterior caso, se obtiene una correlación en función del caudal para cada una de las variables a estudio, quedando de la siguiente forma:

$$k_{vA} = 0,12 + 3,07 \times 10^{-4} Q_A \quad (3)$$

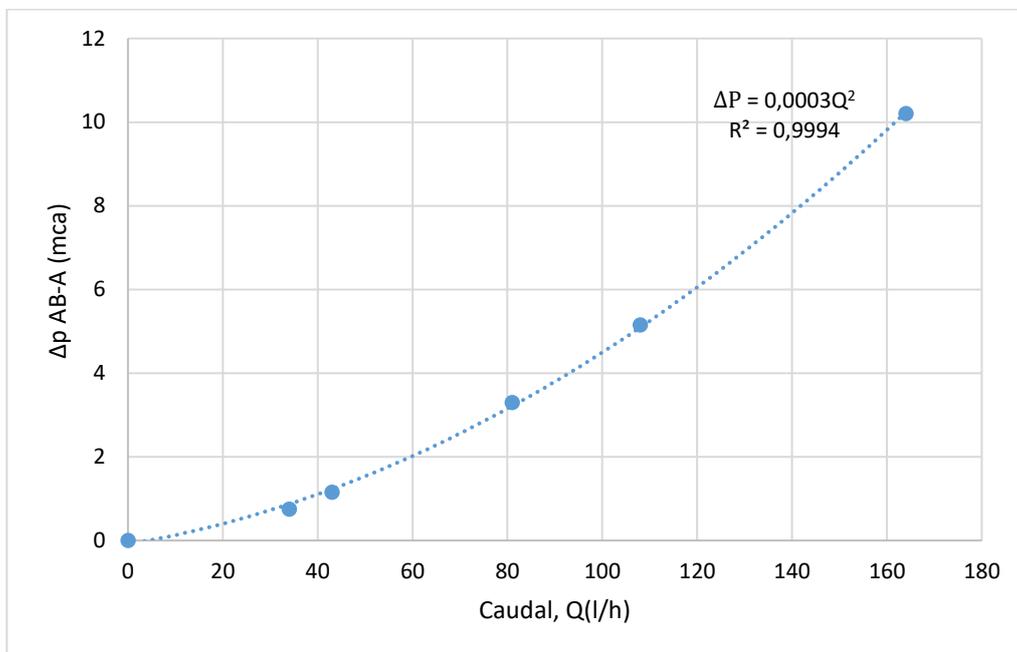
$$\xi_A = 11,96 - 36,20 \times 10^{-3} Q_A \quad (4)$$

$$k_{vB} = 0,11 + 1,12 \times 10^{-3} Q_B \quad (5)$$

$$\xi_B = 13,86 - 86,60 \times 10^{-3} Q_B \quad (6)$$

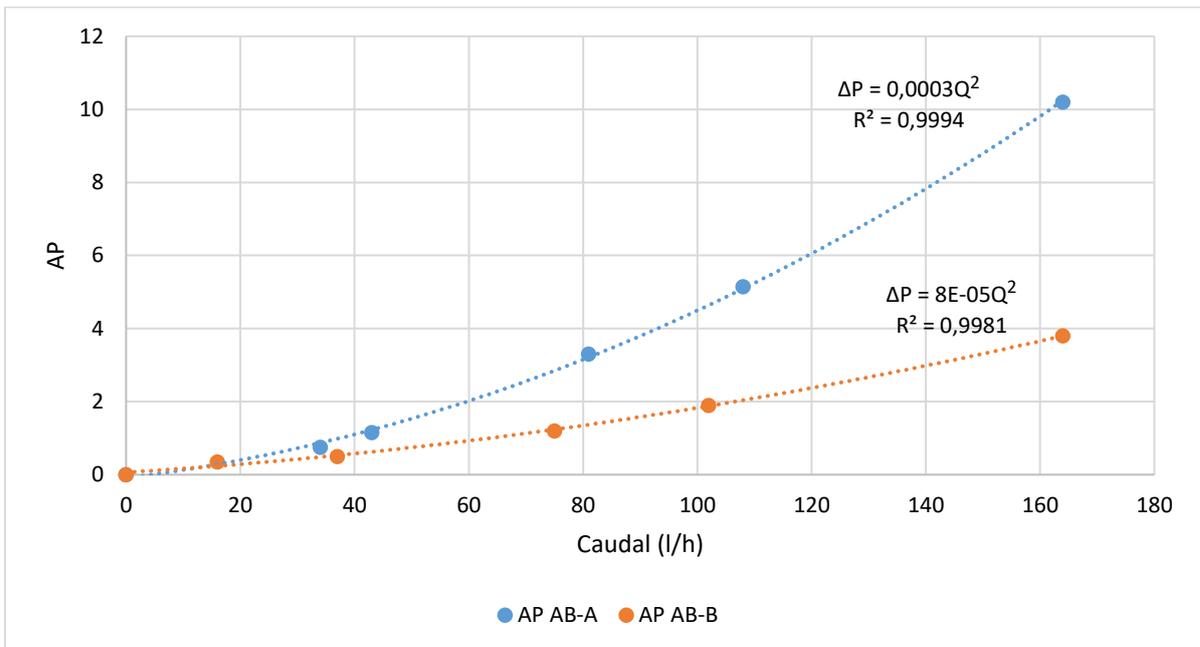


**Figura 67.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 6,5V para AB-B, válvula 3 vías divisora.



**Figura 68.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 6,5V para AB-A, válvula 3 vías divisora.

En la Figura 69, se muestra una comparativa de pérdidas para las dos salidas, A y B. En ella se muestra que, para un mismo caudal, las pérdidas en A son mayores a las de B, debido a la mayor fricción del fluido con las paredes de la válvula en el recorrido AB-A.



**Figura 69.** Comparativa pérdidas salida A y B, tensión 6,5V para válvula 3 vías divisora.

Por último, la tensión de 10 V nos permite solo el paso AB-A, así pues, los valores para B serán,  $k_{vB} = 0$  y  $\xi_B = 0$ .

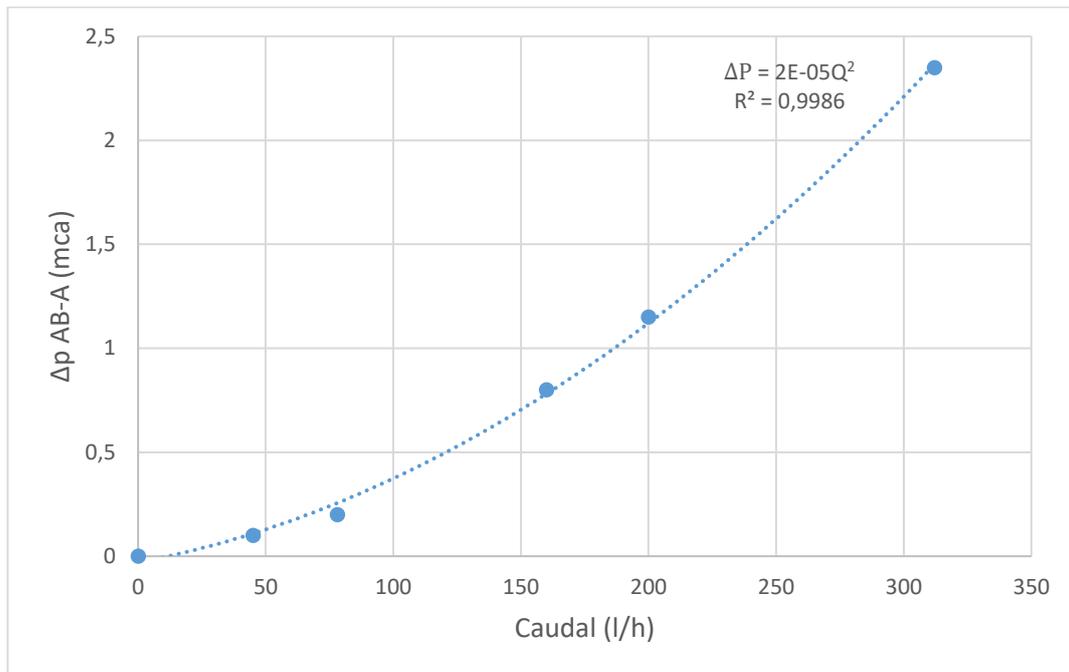
QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta P$ AB-A (mca)	$\Delta P$ AB-B (mca)	$\xi_A$	$k_{vA}$
312	312	0	2,350	2,350	0,411	0,650
200	200	0	1,150	1,150	0,490	0,595
160	160	0	0,800	0,800	0,533	0,571
78	78	0	0,200	0,200	0,560	0,557
45	45	0	0,100	0,100	0,842	0,454

**Tabla 19.** Tabla de resultados para tensión 10V, válvula 3 vías divisora.

Para el caso de 10V se obtienen las siguientes correlaciones para  $k_{vA}$  y  $\xi_A$

$$k_{vA} = 0,47 + 6,17 \times 10^{-4} Q_A \quad (7)$$

$$\xi_A = 0,78 - 86,8 \times 10^{-3} Q_A \quad (8)$$



**Figura 70.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 10V para AB-A, válvula 3 vías divisora.

A partir de los resultados obtenidos, y reflejados en el Anexo II, para la variable más relevante, se puede obtener para el coeficiente de caudal  $k_v$ , una correlación en función del caudal y de la tensión aplicada al actuador para las salidas A y B de la válvula.

$$k_{vA} = f(Q_A, V)$$

$$k_{vB} = f(Q_B, V)$$

Quedando de la siguiente forma,

$$k_{vA} = 0,001Q_A + 0,028V \quad (9)$$

$$k_{vB} = 0,002Q_B - 0,013V \quad (10)$$

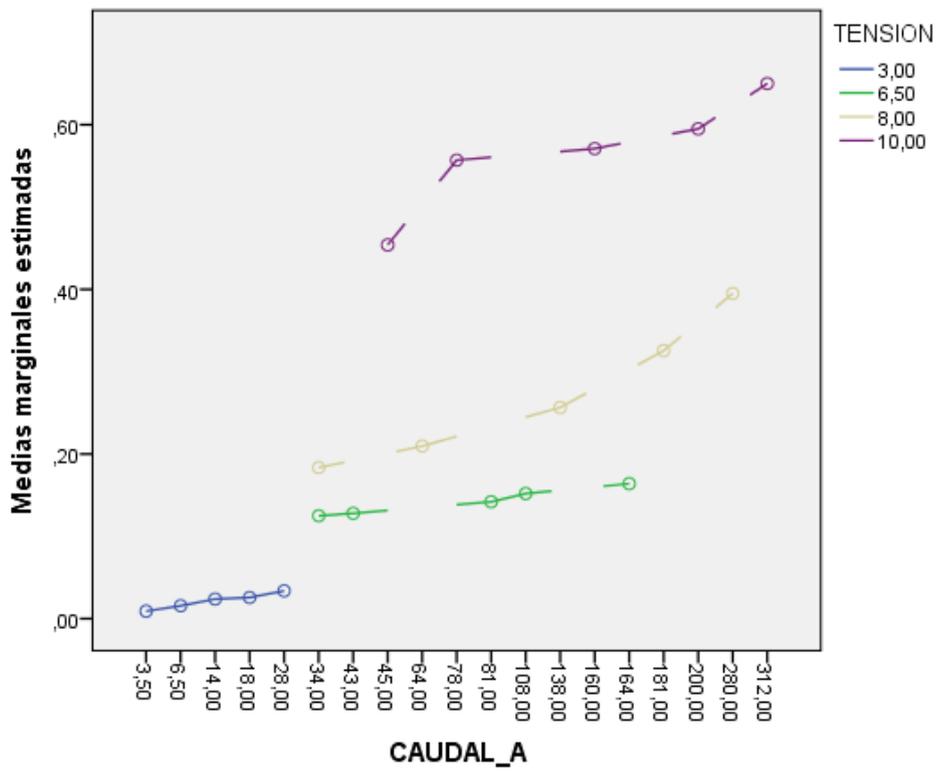


Figura 71. Coeficiente de caudal  $k_{vA}$  según tensión aplicada.

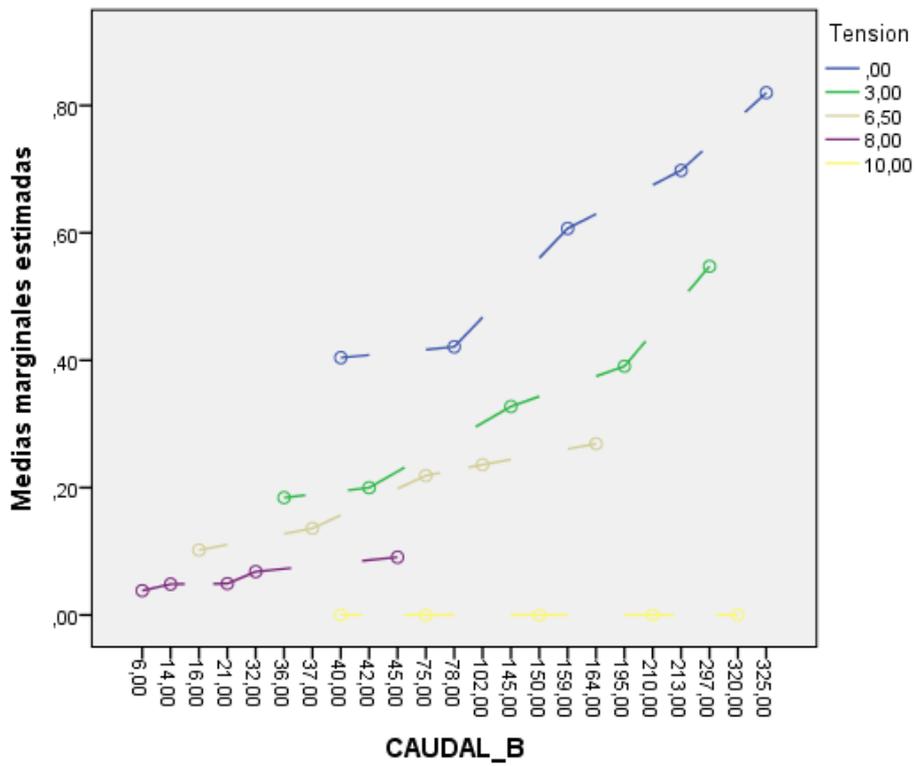
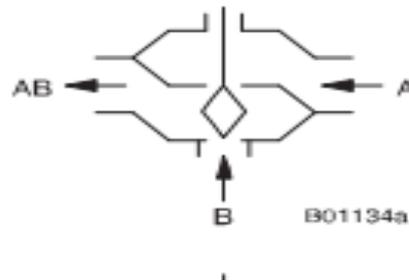


Figura 72. Coeficiente de caudal  $k_{vB}$  según tensión aplicada.

## b) Válvula de control

En esta configuración la válvula tendrá dos entradas (A y B), y una única salida (AB). Las tensiones de cálculo han sido 10V, 6,5V y 0V.



**Figura 73.** Configuración en función de control.

Para la tensión 0V, A permanecerá cerrado, quedando solamente la comunicación B-AB. Una tensión de 5V deja paso tanto por A y B, dejando pasar aproximadamente el mismo caudal en las dos entradas. Y, por último, para la tensión 10V tendremos cerrado el paso por B, dejando solo la comunicación A-AB.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos. En la Tabla 21 se ve todos los valores obtenidos para la tensión 10V. Como se ha dicho anteriormente, solo se permite el paso por A, dejando B bloqueada. Esto supone que los valores  $k_{vB} = 0$  y  $\xi_B = 0$ .

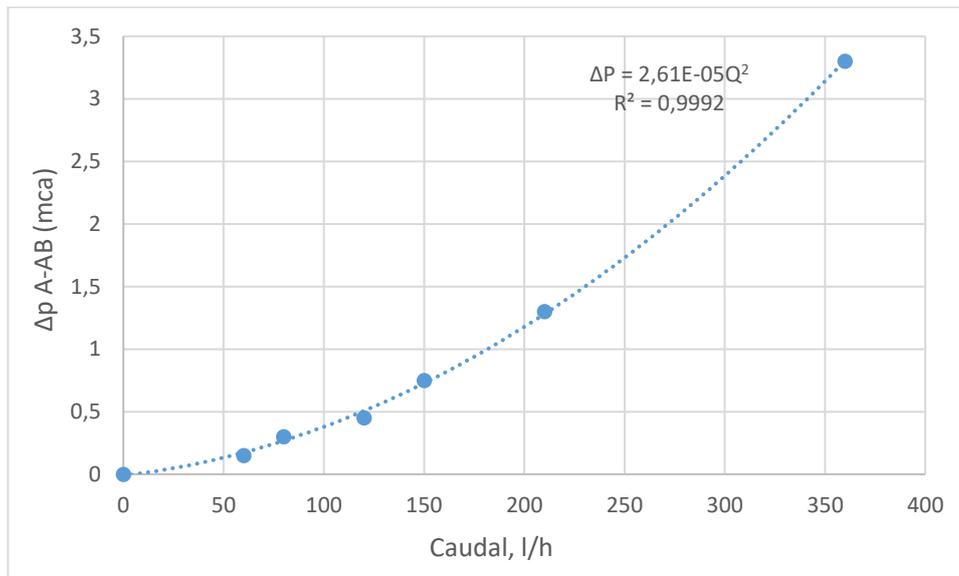
QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta p$ B-AB (mca)	$\Delta p$ A-AB (mca)	$\xi_A$	$k_{vA}$
360	0	2,500	3,300	0,434	0,633
210	0	2,400	1,300	0,502	0,588
150	0	2,700	0,750	0,568	0,553
120	0	2,800	0,450	0,533	0,571
80	0	2,900	0,300	0,799	0,466
60	0	3,000	0,150	0,710	0,495

**Tabla 21.** Resultados obtenidos para tensión 10V, válvula 3 vías control.

Para los valores de  $k_{vA}$  y  $\xi_A$  no se puede estimar un valor promedio puesto que los valores se alejan de su media, es por ello, que se correlacionan con el caudal mediante las siguientes ecuaciones

$$k_{vA} = 0,47 + 5 \times 10^{-4} Q_A \quad (11)$$

$$\xi_A = 0,76 - 1 \times 10^{-3} Q_A \quad (12)$$



**Figura 74** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 10V para A-AB válvula 3 vías control.

QA(l/h)	QB(l/h)	Δp A (mca)	Δp B(mca)	ξA	kvA	ξB	kvB
150	160	2,400	2,000	1,515	0,339	1,664	0,323
120	120	2,000	1,850	2,189	0,282	2,367	0,271
100	100	1,750	1,550	2,556	0,261	2,982	0,241
80	80	1,050	0,954	2,530	0,262	2,663	0,255
70	70	0,950	0,850	2,956	0,242	3,304	0,229
60	60	0,750	0,680	3,007	0,271	3,550	0,221

**Tabla 20.** Tabla de resultados para tensión 5V válvula 3 vías control.

De igual modo que para el anterior caso, se obtiene una correlación en función del caudal para cada uno de los valores de las variables a estudio, quedando de la siguiente forma:

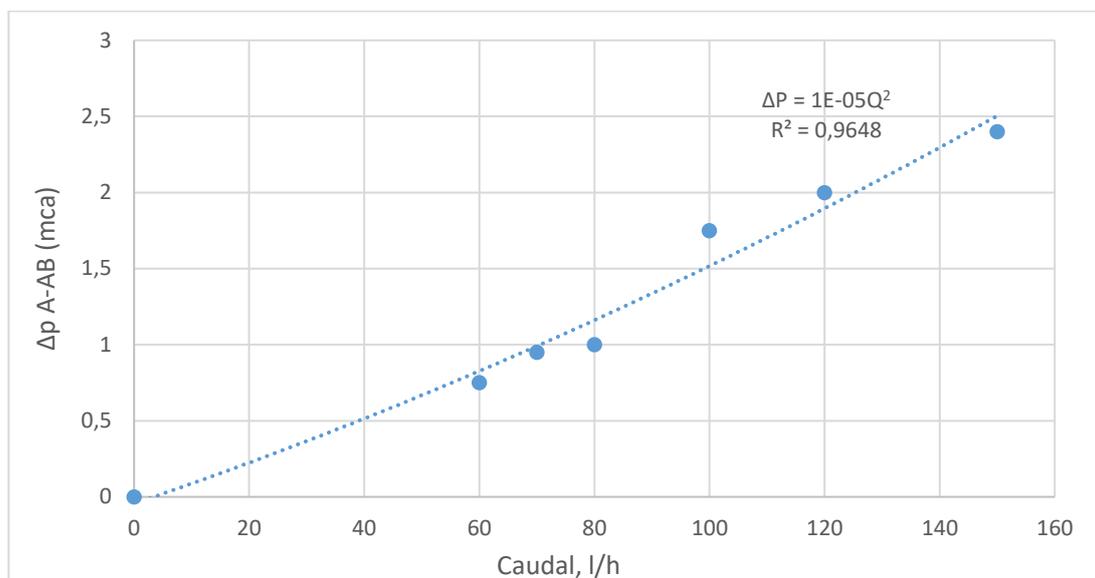
$$k_{vA} = 0,17 + 1 \times 10^{-3}Q_A \quad (13)$$

$$\xi_A = 4,05 - 16,3 \times 10^{-2}Q_A \quad (14)$$

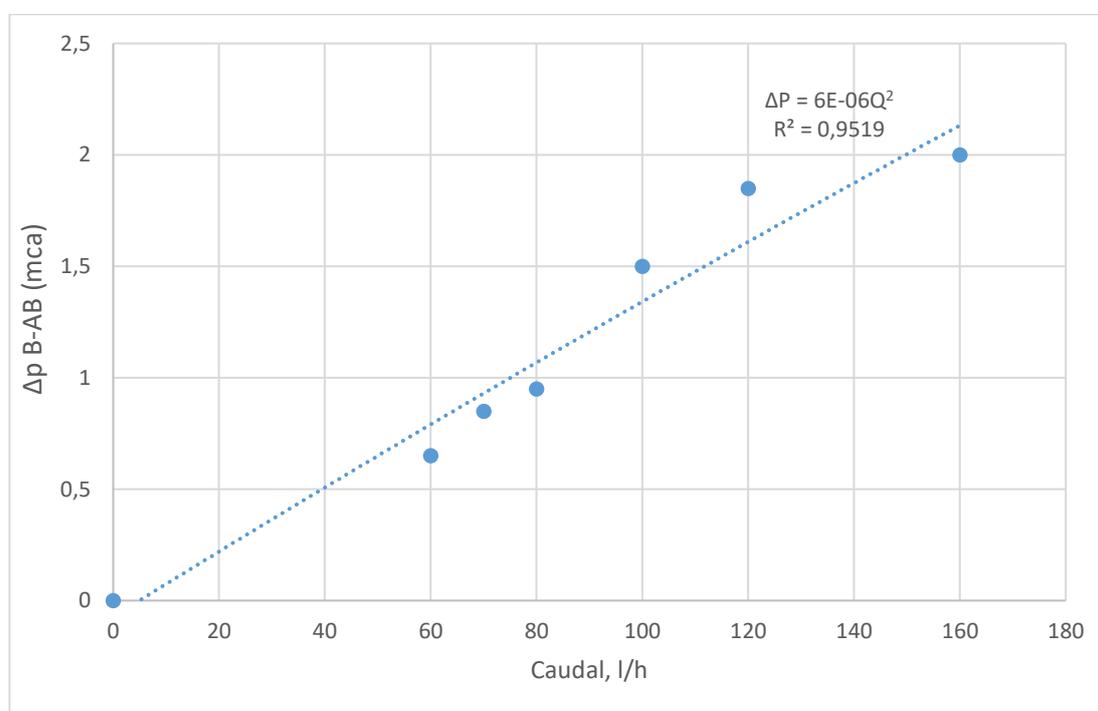
$$k_{vB} = 0,16 + 1,20 \times 10^{-3}Q_B \quad (15)$$

$$\xi_B = 4,07 - 16,60 \times 10^{-3}Q_B \quad (16)$$

Como se muestra en la Figura 75 y 76 (tensión 5V), las pérdidas para el recorrido A-AB son mayores que para B-AB. Esto es debido a la mayor fricción, en el interior de la válvula, que se da en el primer camino comentado. Esta diferencia no tendría que ser tan elevada, pudiendo ser el problema el error a la hora de determinar las pérdidas. Para la tensión 0V, los coeficientes para la salida A serán 0, dejando como uno recorrido B-BA.



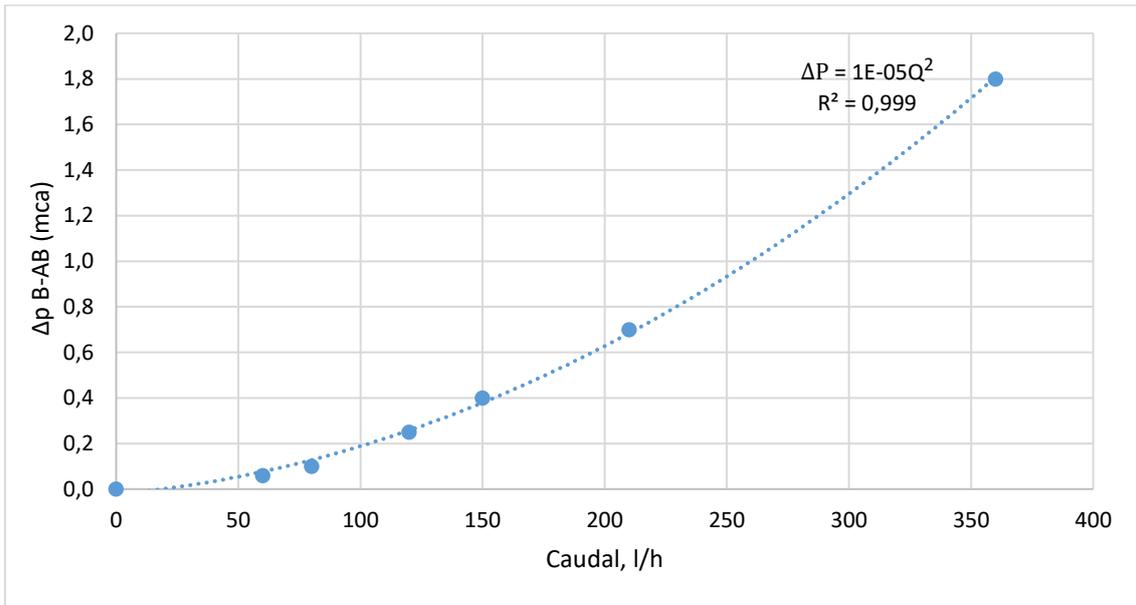
**Figura 75.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 5V para A-AB válvula 3 vías control.



**Figura 76.** Pérdida de presión en función del caudal para tensión 5V para B-AB válvula 3 vías control.

QA(l/h)	QB(l/h)	Δp B (mca)	Δp A (mca)	ξB	KvB
0	360	1,900	3,000	0,250	0,834
0	210	0,650	2,600	0,251	0,832
0	150	0,350	2,100	0,265	0,809
0	120	0,250	1,560	0,296	0,766
0	80	0,120	1,050	0,320	0,737
0	60	0,085	0,650	0,402	0,657

**Tabla 21.** Resultados obtenidos para la tensión 0V válvula 3 vías control.



**Figura 77.** Pérdidas para tensión 0V B-AB V válvula 3 vías control.

Para el caso de 0V se obtienen las siguientes correlaciones para  $k_{vB}$  y  $\xi_B$

$$k_{vB} = 0,69 + 5 \times 10^{-4} Q_B \quad (17)$$

$$\xi_B = 0,36 - 4 \times 10^{-3} Q_B \quad (18)$$

A partir de los resultados obtenidos, reflejados en el Anexo II, al igual que para la función divisora de la válvula, se puede obtener para  $k_v$  una correlación en función del caudal y de la tensión aplicada al actuador para las salidas A y B de la válvula.

$$k_{vA} = f(Q_A, V)$$

$$k_{vB} = f(Q_B, V)$$

Quedando de la siguiente forma

$$k_{vA} = 0,001 Q_A + 0,033 V \quad (20)$$

$$k_{vB} = 0,003 Q_B - 0,002 V \quad (21)$$

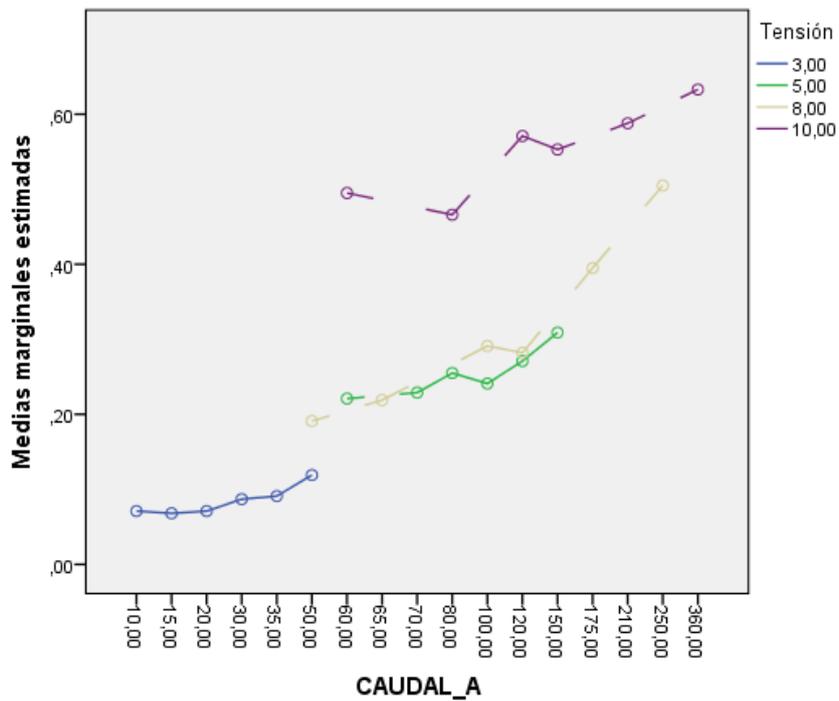


Figura 78. Coeficiente de caudal  $k_{vA}$  según tensión aplicada

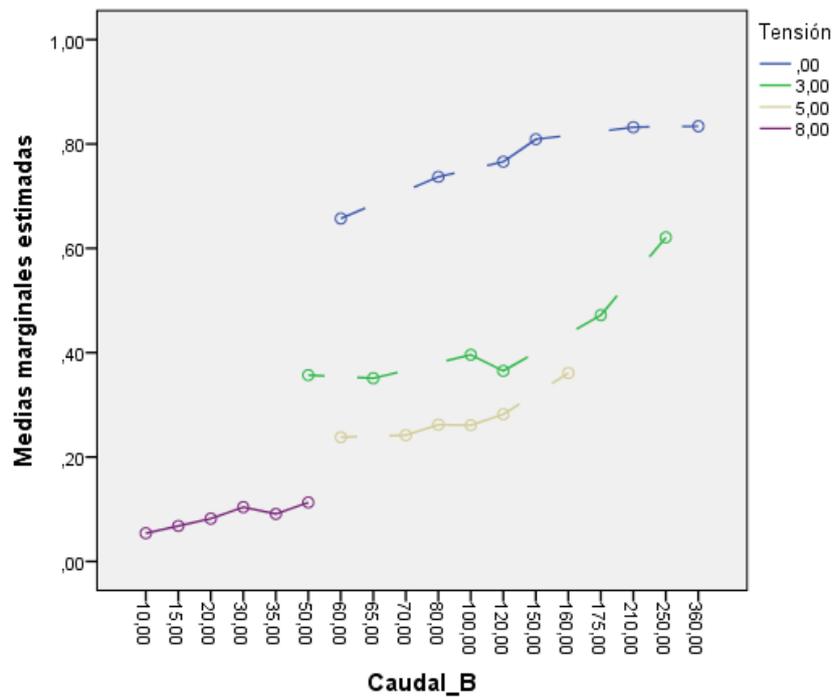


Figura 79. Coeficiente de caudal  $k_{vB}$  según tensión aplicada

Tras el análisis de los resultados, podemos determinar que hay una relación aproximadamente lineal entre el caudal, la tensión y el coeficiente de caudal  $k_v$ . Así pues, podremos determinar aproximadamente el coeficiente de caudal para todo tipo de casos sabiendo el caudal y tensión de trabajo de los actuadores.

Por lo tanto, podemos hacer uso de esta variable para el cálculo de las pérdidas de la instalación, con el fin de determinar el grupo de bombeo adecuado, teniendo en cuenta el caudal y tensión de trabajo para cada actuador montado en la instalación.

### 6.2.2 Cálculo hidráulico del grupo de bombeo.

Para determinar las bombas adecuadas para la instalación, se desarrollan los cálculos para estimar las pérdidas totales de la instalación debidas a los equipos que la forman. Se tendrán en cuenta todos los equipos que forman el circuito primario, además del coeficiente de rozamiento de las tuberías, codos y demás accesorios que formen el sistema. A continuación, se detalla el proceso de cálculo del grupo hidráulico de la nueva instalación solar con sistema de almacenamiento de calor sensible y latente con PCM como sistema de almacenamiento de calor.

#### 6.2.2.1 Fundamentos

La pérdida de presión en las instalaciones se produce por la fricción de las partículas del fluido entre sí, y el rozamiento con las paredes de los componentes hidráulicos y/o accesorios que forman la instalación, disminuyendo la presión a valores inferiores a los de entrada. Es por ello, que el sistema de bombeo debe estar bien dimensionado para que sea capaz de vencer a las pérdidas producidas en el circuito.

De una manera gráfica, podremos ver el punto de funcionamiento de la bomba mediante la intersección de la curva motriz de la bomba y la curva resistente de la instalación. La curva motriz se puede obtener a partir del catálogo del fabricante o de una manera más simple mediante  $H_m = C - DQ^2$  (22), siendo  $H_m$  altura suministrada por la bomba.

Por otro lado, la curva resistente de una instalación se puede modelar en función del caudal  $Q$ ,

$$H_r = \frac{\Delta P}{\rho g} + 0,0826 \left( \lambda_D \frac{L}{D^5} + \frac{\sum K}{D^4} \right) Q^2 = E + FQ^2 \quad (23)$$

en el que el término  $E$  representa la altura manométrica necesaria a caudal nulo y el término  $F$  tiene en cuenta las características de la instalación: longitud, diámetros, coeficiente de pérdidas de los accesorios, coeficiente de fricción, en el que a su vez se engloba la rugosidad relativa y el número de Reynolds, es decir, el material de la conducción y las propiedades físicas del fluido impulsado.

Así pues, se podrá obtener grupos de bombeo adecuados para el proceso de carga y descarga de la instalación. Bombas que podrán vencer las pérdidas resultantes y también, asegurar el rango de caudales adecuado para cada proceso.

### 6.2.2.2 Datos de partida

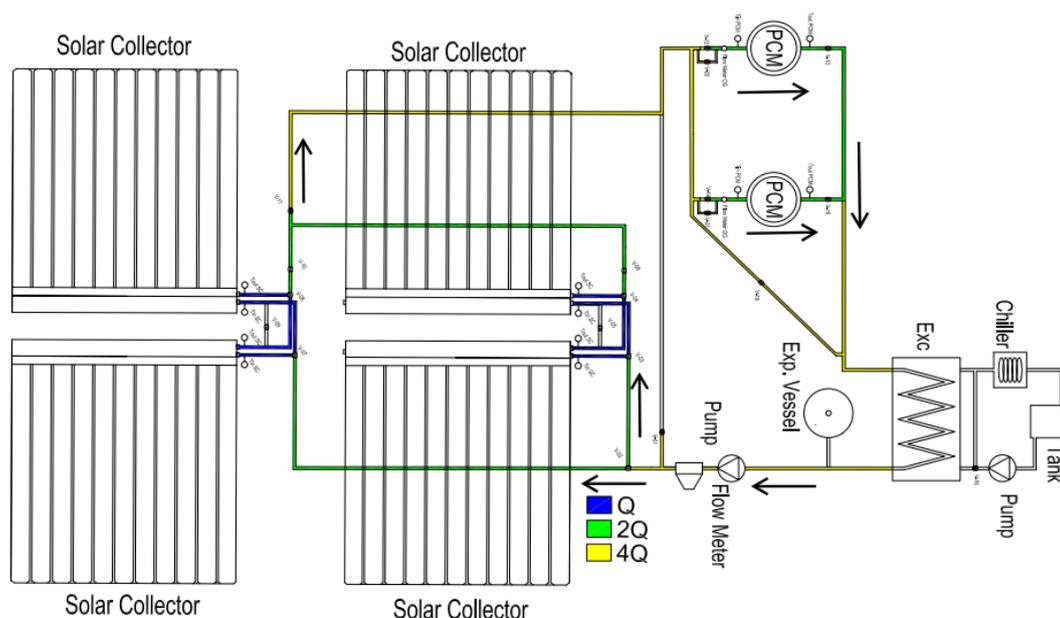
Partiremos de la necesidad de disponer de dos grupos de bombeo independientes para el proceso de carga y descarga, puesto que sus caudales son de rangos diferentes, haciendo imposible que solo un grupo de bombeo pueda suministrarlos.

Los cálculos se realizarán para las condiciones más desfavorables, siendo para el proceso de carga cuando los cuatro colectores están en uso. Y para el proceso de descarga, cuando los dos acumuladores están trabajando.

Para los dos procesos, se llevará a cabo una división de sus tramos de tubería, en relación al caudal que circule por cada uno de ellos. En las siguientes figuras se muestra un esquema de los tramos para cada instalación. Para el proceso de carga se define  $Q$ , como el caudal óptimo para cada colector, siendo  $2Q$  y  $4Q$ , múltiplos de éste.

Tramo	Q	Caudal, $m^3/h$	Longitud tramo
1	Q	0,078	10
2	2Q	0,156	24
3	4Q	0,312	30

**Tabla 22.** Datos para el proceso de carga.

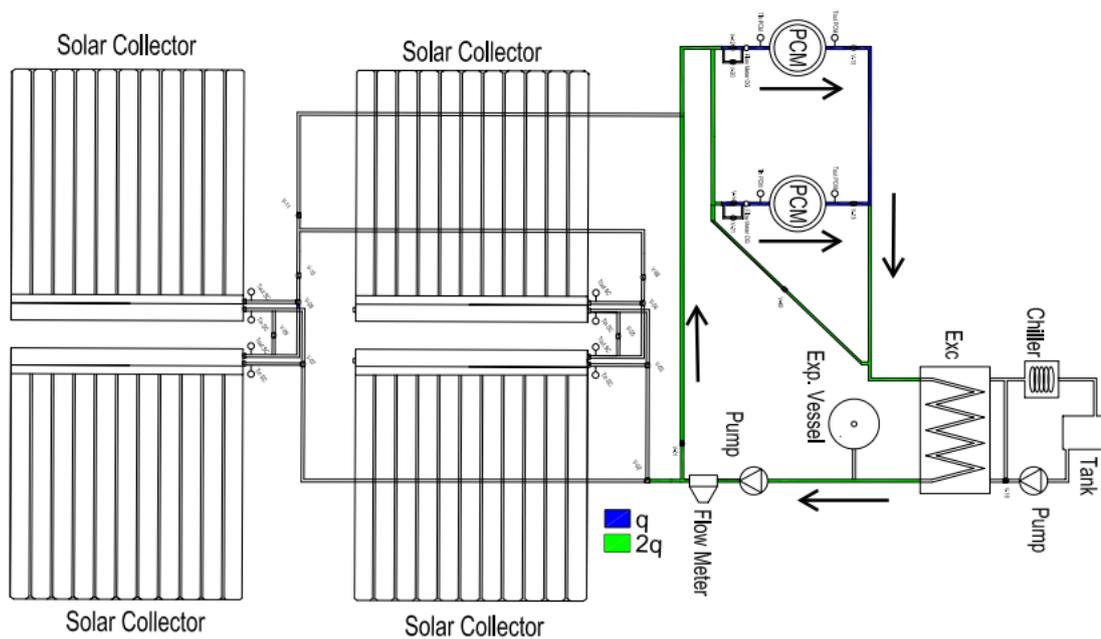


**Figura 80.** Tramos de tubería para el proceso de carga en función del caudal.

De igual forma, se define el caudal de descarga,  $q$  al que pasa por cada uno de los acumuladores de la instalación, siendo  $2q$  múltiplo del primero. En este caso el fluido circulará por el bypass de cada acumulador, compuesto por válvulas del tipo VUN020F300 de dos vías, cuyos datos los hemos tomado directamente del fabricante.

Tramo	$q$	Caudal, $m^3/h$	Longitud tramo
1	$q$	1,2	5
2	$2q$	2,4	15

**Tabla 23.** Datos para el proceso de descarga



**Figura 81.** Tramos de tubería para el proceso de descarga en función del caudal.

Por último, se indican los parámetros que van a intervenir a la hora de realizar del cálculo.

Parámetros		
Fluido	Agua	
Diámetro interior, $d$	0,025	m
Viscosidad cinemática del agua, $\nu$	0,000001	$m^2/s$
Rugosidad absoluta (tubería de cobre)	0,00006	m

**Tabla 26.** Parámetros de partida.

### 6.2.2.3 Cálculos

#### Proceso de carga

Las pérdidas se dividirán en:

- Pérdidas en los tramos rectos de tubería
- Pérdida por accesorios
- Pérdida por equipos.

Para el cálculo de pérdida en tramos rectos, según la ecuación 2, vienen definidas por

$$H_{tramos\ rectos} = 0,0826(\lambda_D \frac{L}{D^5})Q^2 \quad (24)$$

El coeficiente de fricción,  $\lambda_D$  se calcula mediante la ecuación de Blasius

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_D}} = -2\log_{10}\left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D\sqrt{\lambda_D}}\right) \quad (25)$$

$$Re = \frac{4Q}{\pi Dv} \quad (26)$$

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las pérdidas en tramos rectos en función del caudal que circula por cada uno de ellos, sustituyendo los datos en (24), estando todas las magnitudes en el S.I.

	Caudal, $m^3/h$	Longitudes, m	Re	$\lambda_D$	$\Delta h$ (m c.a.)
Q	0,078	18	1103	0,055	<b>0,004</b>
2Q	0,156	10	2207	0,049	<b>0,005</b>
4Q	0,312	30	4414	0,038	<b>0,028</b>
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>0,037</b>

**Tabla 27.** Pérdida de carga en tramos rectos.

Las pérdidas en los accesorios se determinan en función de los valores de los coeficientes de pérdidas, K

$$H_{accesorios} = \left(\frac{\sum K}{D^4}\right)Q^2 \quad (27)$$

<b>Coefficientes de pérdidas, K</b>	
Codos 90°	<b>0,6</b>
T	<b>1,2</b>
Ensanchamiento	<b>0,15</b>

**Tabla 28.** Coeficientes de pérdidas accesorios.

Se muestra a continuación, las pérdidas en los accesorios en función del caudal que circula por cada uno de ellos. Se indica el número de accesorios que pasa cada uno de los caudales.

	Caudal, m <sup>3</sup> /h	Ensanchamiento	T	Codo	$\Delta h$ (m c.a.)
Q	0,078	2	3	5	<b>0,001</b>
2Q	0,156		1	1	<b>0,001</b>
4Q	0,312		4	3	<b>0,012</b>
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>0,014</b>

**Tabla 29.** Pérdidas de carga en accesorios.

Por otro lado, vamos a tener en cuenta y de forma separada, las pérdidas de las válvulas que componen el sistema. Se desarrolló un estudio experimental para evaluar las pérdidas de las electroválvulas según el grado de apertura de las mismas, con el fin de estimar el coeficiente de pérdidas de cada una de ellas. Su valor será muy significativo debido a la cantidad de válvulas que compone el sistema, además de tratarse de un sistema cerrado. Las pérdidas calculadas según la ecuación (27) se muestran a continuación.

	2V (10 V)	3V (DIVISORA 10 V)	3V (DIVISORA 5 V)	3V (CONTROL 5 V)	$\Delta h$ (m c.a.)
Q	0	0	1	1	13,446
2Q	1	0	0	0	0,633
4Q	1	1	0	0	5,639
$K_V$	0,626	0,565	0,142	0,077	
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>19,718</b>

**Tabla 30.** Pérdida de carga en válvulas.

Con lo que respecta a las pérdidas que se producen en equipos e instrumentación, se han determinado según diagramas de pérdidas de los equipos en función del caudal, así se ha hecho una estimación de las pérdidas que se producen.

	$\Delta h$ (m c.a.) int placas	$\Delta h$ (m c.a.) acumulador	$\Delta h$ (m c.a.) colector	$\Delta h$ (m c.a.) caudalímetro	$\Delta h$ (m c.a.)
Q	-	0,300	0,031	0,460	0,791
2Q	-	-	-	-	-
4Q	0,121	-	-	0,460	0,581
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>1,372</b>

**Tabla 31.** Pérdidas de carga en equipos.

Haciendo uso de la ecuación 23

$$H_r = \frac{\Delta P}{\rho g} + 0,0826 \left( \lambda_D \frac{L}{D^5} + \frac{\sum K}{D^4} \right) Q^2 = E + FQ^2$$

Sabiendo que el sistema es cerrado y está presurizado, el termino E de la fórmula es 0

$$H_r = \frac{\Delta P}{\rho g} + 0,0826 \left( \lambda_D \frac{L}{D^5} + \frac{\sum K}{D^4} \right) Q^2 = E + FQ^2 = FQ^2 = 2,8 \times 10^9 Q^2$$

El término F, será la suma de todas las pérdidas totales calculadas anteriormente, quedando finalmente las pérdidas totales de la instalación,

$$H_r = 21,069 \text{ m.c.a.}$$

El modelo MKX-1395-1-6 de la marca SAER ha sido el seleccionado ya que puede vencer las perdidas máximas de la instalación y satisfacer el rango de caudales de carga de la instalación. Su punto de funcionamiento, vendrá determinado por las siguientes ecuaciones, siendo  $Q_{PF}$ ,  $H_{PF}$  el caudal y altura de funcionamiento, respectivamente. Se hallará igualando la curva motriz y la curva resistente de la instalación.

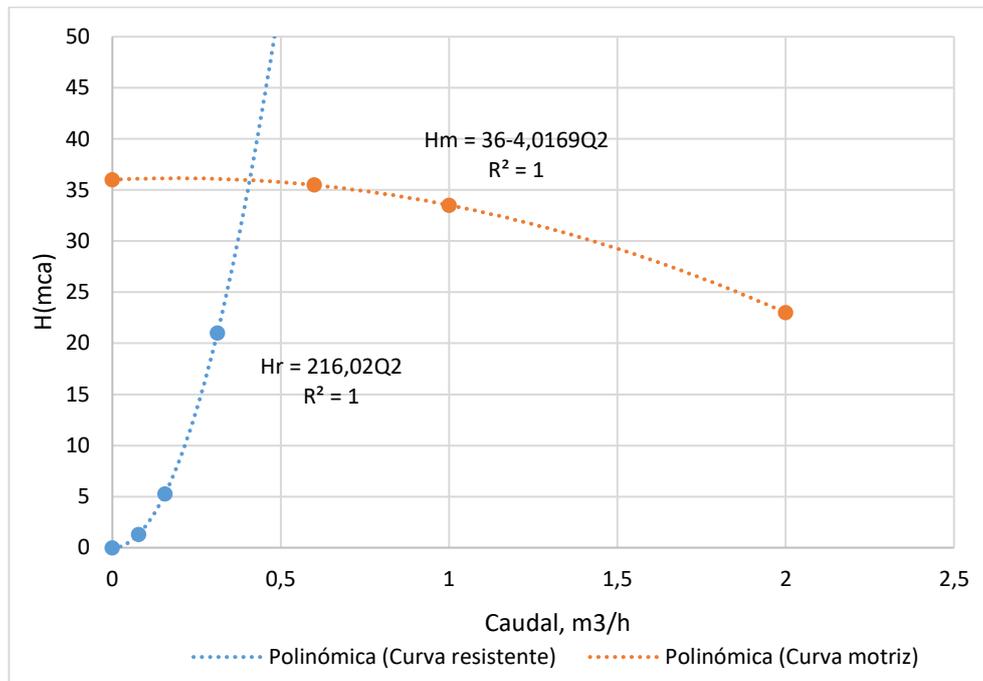
$$H_m = H_r$$

$$C - D^2 = E + FQ^2$$

$$Q_{PF} = \sqrt{\frac{C - E}{F + D}} = \sqrt{\frac{36 - 0}{216,02 + 4,02}} = 0,401 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_m = 36 - 4,0169 \times (0,401)^2 = 35,354 \text{ mca}$$

A continuación, se muestra el punto de funcionamiento de la bomba mediante la intersección de la curva resistente y motriz de la bomba.



**Figura 82.** Punto de funcionamiento de la bomba SAER MKX-1395-1-6.

### Proceso de descarga

De igual manera que para el proceso de carga, se calculará las pérdidas para el proceso de descarga. Siendo en este caso,  $q$  el caudal de descarga. Calculamos la bomba para  $3q$ , por una futura instalación de otro acumulador más.

	Caudal, $m^3/h$	Longitudes, m	Re	$\lambda_D$	$\Delta h$ (m c.a.)
$q$	1,2	10	16976,532	0,027	<b>0,035</b>
$2q$	2,4	5	33953,055	0,023	<b>0,035</b>
$3q$	3,6	15	50930,210	0,001	<b>0,159</b>
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>0,230</b>

**Tabla 32.** Pérdidas de carga en tramos rectos.

	Caudal, $m^3/h$	Ensanchamiento	T	Codo	$\Delta h$ (m c.a.)
$q$	1,2	-	2	1	<b>0,071</b>
$2q$	2,4	-	-	-	<b>0</b>
$3q$	3,6	-	-	3	<b>0,381</b>
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>0,451</b>

**Tabla 33.** Pérdidas de carga en accesorios.

En el proceso de descarga como ya se explicó anteriormente, el fluido pasará por el bypass de cada uno de los acumuladores, donde se dispondrá una válvula de tipo VUN020F300, cuyas pérdidas han sido determinadas directamente de la información del fabricante.

	VUN020F300	3V(10V) DIVISORA	$\Delta h$ (m c.a.)
q	3	-	9,486
2q	-	-	0
3q	-	-	0
$K_v$	3,756	0,565	0
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>			<b>9,486</b>

**Tabla 34.** Pérdidas de carga en válvulas.

En las pérdidas de los equipos no se tendrá en cuenta los colectores, puesto que en este proceso no intervienen (Figura 33).

	$\Delta h$ (m c.a.) int placas	$\Delta h$ (m.c.a.) acumulador	$\Delta h$ (m.c.a.) colector	$\Delta h$ (m.c.a.) caudalímetro	$\Delta h$ (m c.a.)
q	-	1	-	3	1,380
2q	-	-	-	-	-
3q	1	-	-	-	7,318
<b>TOTAL, <math>\Delta h</math> (m c.a.)</b>					<b>8,698</b>

**Tabla 35.** Pérdidas de carga en equipos.

Haciendo uso de la ecuación 23

$$H_r = \frac{\Delta P}{\rho g} + 0,0826 \left( \lambda_D \frac{L}{D^5} + \frac{\sum K}{D^4} \right) Q^2 = E + FQ^2$$

Sabiendo que el sistema es cerrado y está presurizado, el termino E de la fórmula es 0

$$H_r = \frac{\Delta P}{\rho g} + 0,0826 \left( \lambda_D \frac{L}{D^5} + \frac{\sum K}{D^4} \right) Q^2 = E + FQ^2 = FQ^2 = 18386500Q^2$$

$$H_r = 18,865 \text{ mca}$$

Para el proceso de descarga se seleccionó la bomba CMP-76 de la marca SAER, que cumple con las condiciones de pérdida y rango de caudales establecido. Procedemos al cálculo del punto de funcionamiento PF.

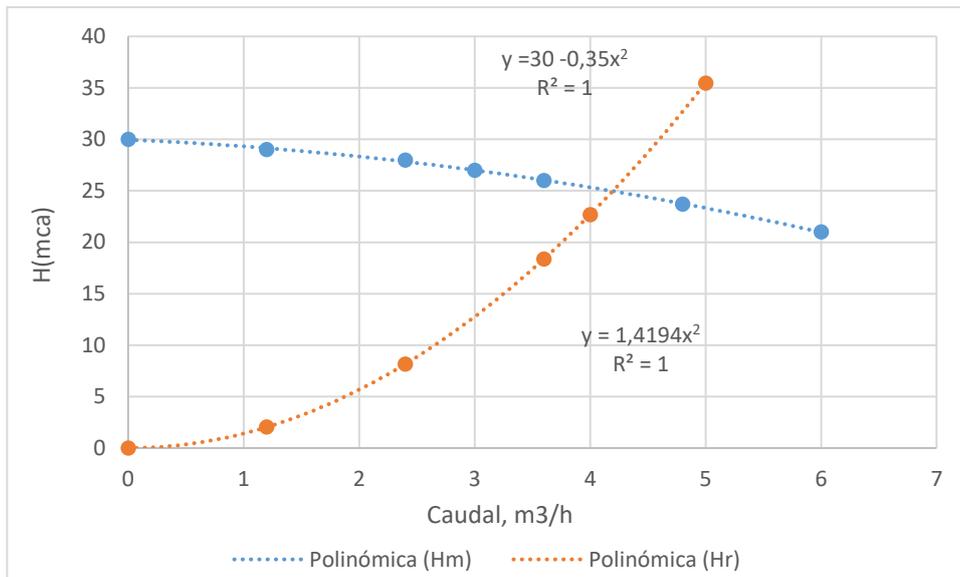
$$H_m = H_r$$

$$C - D^2 = E + FQ^2$$

$$Q_{PF} = \sqrt{\frac{C - E}{F + D}} = \sqrt{\frac{30 - 0}{1,4194 + 0,30}} = 4,178 \text{ m}^3/h$$

$$H_m = 30 - 0,35 \times (4,188)^2 = 24,766 \text{ mca}$$

A continuación, se muestra el punto de funcionamiento de la bomba mediante la intersección de la curva resistente y motriz de la bomba.



**Figura 83.** Punto de funcionamiento bomba SAER CMP-76.

Así pues, utilizando la gráfica del fabricante podemos sacar aproximadamente el rendimiento y la potencia que tendrá en el punto de funcionamiento de la bomba.

$$\text{NPSHr} = 4$$

$$\eta = 55\%$$

$$P = 0,53 \text{ kW}$$

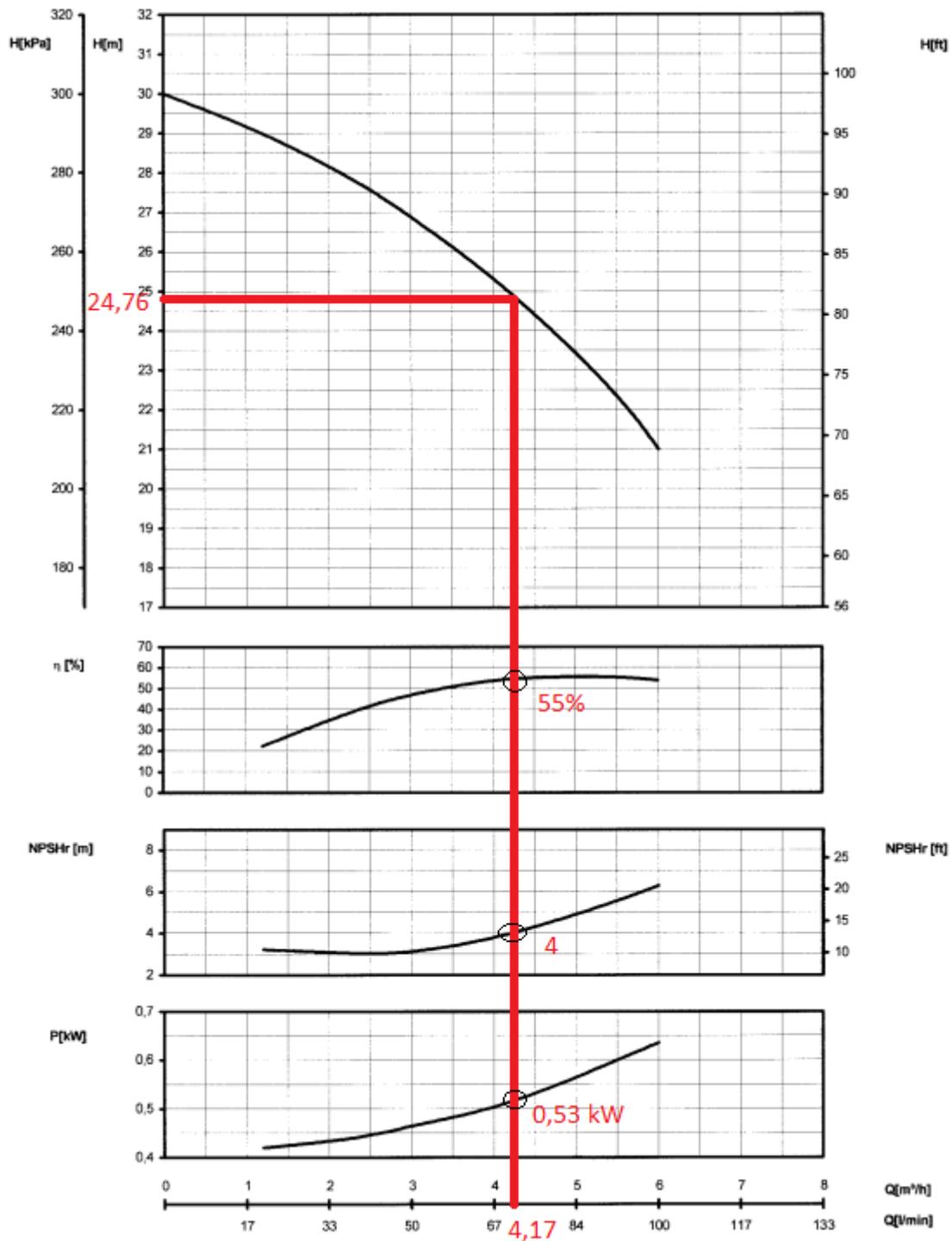


Figura 84. Condiciones de funcionamiento en PF, SAER CMP-76.

### 6.3 Especificación técnica de la nueva instrumentación necesaria.

Los instrumentos de medida, ya comentados en apartados anteriores, serán los mismos que la instalación anteriormente desarrollada en la UPCT.

## Caudal

Dispondremos de un Coriolis ROTAMASS PRIME 25 para medir el caudal del circuito principal tanto para la carga y la descarga. Las conexiones de este equipo serán de DN25, dispondrá de un rango de medida adecuado para la instalación, además de soportar las temperaturas que se darán en el sistema.



	Prime 25	Prime 40	Prime 50	Prime 80	
<b>Mass flow range</b>					
Typical connection size	DN25/ 1"	DN40/ 1½"	DN50/ 2"	DN 80/ 3"	
Q <sub>nom</sub>	1.6 t/h	4.7 t/h	20 t/h	51 t/h	[▶ 12]
Q <sub>max</sub>	2.3 t/h	7 t/h	29 t/h	76 t/h	
<b>Maximum volume flow</b>					
(Water)	2.3 m³/h	7 m³/h	29 m³/h	76 m³/h	[▶ 12]
<b>Range of medium density</b>	0...5 kg/l				[▶ 13]
<b>Medium temperature range</b>	-70...200 °C				[▶ 24]
Standard <sup>1)</sup>					

**Figura 85.** Coriolis ROTAMASS PRIME 25

Además, para tener un control del caudal que circula en cada acumulador, se tendrá en cada entrada un caudalímetro de rueda ovalada para determinar con exactitud esta



variable.

**Figura 86.** Caudalímetros entrada acumuladores.

## Radiación.

Tenemos un piranómetro que hemos recuperado de la instalación antigua y hemos recalibrado por medio del CIEMAT modelo SMP 10.



### CMP pyranometers

Specifications	CMP3	CMP6	CMP10 and CMP11	CMP21	CMP22
Classification to ISO 9060:1990	Second Class	First Class	Secondary Standard	Secondary Standard	Secondary Standard
Sensitivity	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Impedance	20 to 200 $\Omega$	20 to 200 $\Omega$	10 to 100 $\Omega$	10 to 100 $\Omega$	10 to 100 $\Omega$
Expected output range (0 to 1500 $\text{W}/\text{m}^2$ )	0 to 30 mV	0 to 30 mV	0 to 20 mV	0 to 20 mV	0 to 20 mV
Maximum operational irradiance	2000 $\text{W}/\text{m}^2$	2000 $\text{W}/\text{m}^2$	4000 $\text{W}/\text{m}^2$	4000 $\text{W}/\text{m}^2$	4000 $\text{W}/\text{m}^2$
Response time (63%)	< 6 s	< 6 s	< 1.7 s	< 1.7 s	< 1.7 s
Response time (65%)	< 18 s	< 18 s	< 5 s	< 5 s	< 5 s
Spectral range (20% points)	285 to 3000 nm	270 to 3000 nm	270 to 3000 nm	270 to 3000 nm	270 to 3000 nm
Spectral range (60% points)	300 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm	285 to 2800 nm
Zero offsets (unventilated)					
(a) thermal radiation (at 200 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< 15 $\text{W}/\text{m}^2$	< 10 $\text{W}/\text{m}^2$	< 7 $\text{W}/\text{m}^2$	< 7 $\text{W}/\text{m}^2$	< 3 $\text{W}/\text{m}^2$
(b) temperature change (5 $^\circ\text{C}/\text{h}$ )	< 5 $\text{W}/\text{m}^2$	< 4 $\text{W}/\text{m}^2$	< 2 $\text{W}/\text{m}^2$	< 2 $\text{W}/\text{m}^2$	< 1 $\text{W}/\text{m}^2$
Non-stability (change/year)	< 1%	< 1%	< 0.5%	< 0.5%	< 0.5%
Non-linearity (100 to 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< 1.5%	< 1%	< 0.2%	< 0.2%	< 0.2%
Directional response (up to 80° with 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ beam)	< 20 $\text{W}/\text{m}^2$	< 20 $\text{W}/\text{m}^2$	< 10 $\text{W}/\text{m}^2$	< 10 $\text{W}/\text{m}^2$	< 5 $\text{W}/\text{m}^2$
Spectral selectivity (150 to 1500 nm)	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%
Tilt response (0° to 90° at 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< 1%	< 1%	< 0.2%	< 0.2%	< 0.2%
Temperature response	< 5% (-10°C to +40°C)	< 4% (-10°C to +40°C)	< 1% (-10°C to +40°C)	< 1% (-20°C to +50°C)	< 0.5% (-20°C to +50°C)
Field of view	180°	180°	180°	180°	180°
Accuracy of bubble level	< 0.2°	< 0.1°	< 0.1°	< 0.1°	< 0.1°
Temperature sensor output				10k Thermistor (optional Pt-100)	10k Thermistor (optional Pt-100)
Detector type	Thermopile	Thermopile	Thermopile	Thermopile	Thermopile
Operating and storage temperature range	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C	-40°C to +80°C
Humidity range	0 to 100%	0 to 100%	0 to 100%	0 to 100%	0 to 100%
MTBF (Mean Time Between Failures)	> 10 years	> 10 years	> 10 years	> 10 years	> 10 years
Ingress Protection (IP) rating	67	67	67	67	67
Onsite pyranometer uncertainty	Calculate with Suncertainty App	Calculate with Suncertainty App	Calculate with Suncertainty App	Calculate with Suncertainty App	Calculate with Suncertainty App
Recommended applications	Economical solution for routine measurements in weather stations, field testing	Good quality measurements for hydrology networks, greenhouse climate control	Meteorological networks, PV panel and thermal collector testing, materials testing	Meteorological networks, reference measurements in extreme climates, polar or arid	Scientific research requiring the highest level of measurement accuracy and reliability

Figura 87. CIEMAT modelo SMP 10.

## Temperaturas.

Tenemos unas sondas PT-100 para medir temperaturas de entradas y salidas a los acumuladores (en el esquema está indicado dónde irían). Termopares estarán dispuestos en el volumen del acumulador de calor latente y sensible para medir la temperatura en las distintas áreas de éste.



**Figura 88.** Sondas de temperatura PT-100.

## **Capítulo 7. Resumen y conclusiones**

En este trabajo se ha participado en el diseño de una instalación experimental, flexible y modular, que nos permite caracterizar experimentalmente nuevos sistemas de acumulación de energía solar basados en el almacenamiento de calor sensible y latente, utilizando materiales de cambio de fase como medio de almacenamiento.

Se ha participado en la propuesta del diseño de la instalación en base al estudio de diferentes artículos referidos al tema de trabajo, en busca de pautas para los componentes y parámetros de diseño. El sistema se basa en la estructura de las instalaciones solares de baja temperatura formadas por un circuito primario y secundario. En el primero, se llevará a cabo tanto el proceso de carga, como el de descarga, siendo la función del circuito secundario la de refrigeración del sistema.

Los parámetros de diseño determinan la eficiencia de la instalación, así como los componentes e instrumentación que la forman. Un factor fundamental es la energía que tenemos disponible en la ubicación que se ha establecido. Ésta, determinará parámetros como: la superficie de captación, número de colectores, cantidad de PCM, caudal y temperatura de operación, entre otros. El valor máximo lo encontraremos en el mes de junio, con una irradiación diaria de 13,76 kWh/día captada por un solo colector solar. Este dato se alcanza con captadores solares de tubos de vacío, Vitosol 300-TM cuyo rendimiento y temperatura de operación es mayor en comparación a otros tipos existentes en mercado. Cuatro captadores se instalan, ofreciendo diversas posibilidades de acoplamiento, ya sea en paralelo o en serie, dependiendo de las necesidades de energía de la instalación.

Teniendo en cuenta el dato anterior, y sabiendo que PCM se va a utilizar, se estima la cantidad de PCM que se puede fundir. Elegimos parafina RT70HC, PCM orgánico con temperatura de fusión baja y capacidad de almacenamiento térmico elevada, además de ser económico y con alta disponibilidad. Sabiendo que su capacidad de almacenamiento es de 72 Wh/kg, obtenemos una cantidad máxima de PCM de 191,07 kg, con un volumen en estado líquido de 248,14 litros, importante para el diseño del acumulador.

En cuanto a la temperatura de operación, la elección de los colectores será decisiva para llegar a los rangos esperados. Se estima que se puede llegar entorno a los 90-100°C, con un rendimiento del colector aproximado de 60%. Fundamental para el proceso de carga que la temperatura sea superior al punto de fusión de PCM, cuyo valor se comprende entre 69-71°C. Esta variable determinará los tiempos del proceso de carga, puesto que cuanto mayor sea la temperatura y rendimiento, menor será el tiempo de carga. Con lo que respecta a la descarga, se espera llegar a valores entre los 55-60°C ya que su transferencia es menos eficiente que la del proceso de carga, debido a mayor porcentaje de pérdidas de calor.

Por otro lado, se distinguen dos caudales de trabajo, carga y descarga. El primero, dependerá de los colectores solares ya que debe ser el adecuado para éstos trabajen de manera óptima, así pues, el valor corresponderá a 78 l/h por cada colector en uso. De manera análoga, el caudal de descarga depende esta vez del acumulador de calor que se diseñe, siendo su caudal por equipo de 20 l/min, y de las necesidades o potencia térmica requerida.

Así pues, teniendo en consideración alguno de los parámetros anteriores y análisis a los acumuladores de las investigaciones analizadas, se diseña el acumulador de calor sensible y latente con PCM, cuyo objetivo es disminuir el tiempo de carga y tener un reparto homogéneo de calor por todo el volumen interior que lo forma. Se basa en un cilindro horizontal de volumen aproximadamente de 20 litros, en cuyo interior se aloja un entre mallados de acero de poco espesor y un circuito de tuberías de cobre, donde el PCM se encuentra encapsulado entre ellos. Varios orificios de entrada y salida se disponen repartidos por su superficie, además de termopares que determinaran la temperatura en cada instante de tiempo. La diferencia que tienen estos dos equipos se encuentra en los tubos aleteados que forman uno de ellos. Así, podremos hacer la comparativa en cuenta a tiempos y temperaturas que se lleven a cabo en cada uno de ellos, viendo su eficiencia en el proceso de transferencia de calor. Muchas alternativas nos proporcionan estos equipos a

la hora de su estudio, ya que podemos variar el tipo de PCM de estudio, introducir varios tipos de PCM.

Se asume que no habrá ningún problema a la hora de fundir toda la cantidad de PCM puesto que el volumen de cada equipo es inferior a todos los volúmenes que se han previsto inicialmente. Una razón de peso es el coste de fabricación, ya que a más volumen más se encarecería el precio del equipo.

Se tiene previsto, según estudios analizados, que el periodo de carga dure aproximadamente unas 3-4 horas, tiempo en el que toda la masa de PCM se fundirá. Esto dependerá de la época del año en el que nos encontremos, influenciada por la radiación disponible.

Por otro lado, todos los equipos e instrumentación se unirán por medio de tubería de cobre, por cuyo interior circulará agua como fluido calor-portador. La instalación será flexible gracias al sistema de válvulas, de dos y tres vías, que formaran dependiente de su posición diversos circuitos, dejando pasar fluido por uno hasta los cuatro colectores a la vez, como por los dos o solo un acumulador de calor. Así pues, se tendrá varios caudales para el circuito dependiendo de los equipos activos, tanto para carga como descarga, pudiendo hacer posible diversos estudios en función del caudal de operación.

El fluido calor-portador, estará impulsado mediante un grupo de bombeo calculado para vencer las pérdidas hidráulicas de la instalación generada por los equipos y accesorios que forman el sistema, además de cumplir con los rangos de caudales establecidos. Se distinguen dos grupos de bombeo, una para carga y descarga de la instalación. Para su selección se ha procedido al cálculo las pérdidas hidráulicas para sus respectivos circuitos, teniendo en cuenta equipos, accesorios e instrumentación que la forman. Parte importante en este proceso ha sido conocer en detalle como varía el coeficiente de caudal de las válvulas que componen el sistema en función de la tensión aplicada (entre 0 y 10 VDC), ya que, al haber varias válvulas en la instalación, y además al tratarse de un circuito cerrado, las pérdidas en las válvulas han sido una parte importante de las totales en el circuito y, por tanto, influyen sustancialmente en la selección de la bomba. Para ello, se estableció un estudio experimental de las pérdidas de cada una de los tipos de válvulas que se utilizan. A raíz de este estudio, se vio que el coeficiente de pérdidas  $k_v$  depende tanto de la tensión aplicada como del caudal que circula por su interior de las válvulas. Así pues, se estableció un coeficiente de pérdidas para cada una de las tensiones aplicadas al actuador, según el

caudal de trabajo, para así poder determinar de una manera más aproximada las pérdidas totales de la instalación.

Tras determinar las pérdidas hidráulicas para cada proceso, se seleccionaron las bombas MKX-1395-1-6 para el proceso de carga y CMP76 para el de descarga. Ambas, proporcionan altura suficiente para vencer las pérdidas, en función del caudal que circule por la instalación.

Toda la instalación estará en constante análisis gracias a una central de datos que almacenará la información procedente de la instrumentación colocada en toda la instalación, ya sean variables como: temperatura de entrada y salida de los colectores, caudal de trabajo, temperatura en los acumuladores, irradiancia...

Con todo lo anterior, se puede decir que la instalación estará suficientemente dimensionada para cumplir con su fin principal, evaluar la transferencia de calor en el sistema de acumulación de calor latente y sensible. Todos los equipos se han seleccionado con el fin de tener la mejor eficiencia de la instalación, haciendo hincapié en los colectores solares de tubos de vacío con tecnología heat pipe y en el diseño del acumulador de calor latente y sensible, puesto que determinarán muchas de las variables del sistema. La instalación nos servirá como punto de partida para la realización de diversos estudios dada su flexibilidad y sus diferentes configuraciones según los equipos que entren en operación. Además, se podrá utilizar diversos tipos de PCM, evaluando sus propiedades termo-físicas, en busca de mejorar la eficiencia del sistema de una manera progresiva.

## **Anexos**

Anexo I. Ensayo válvulas

Anexo II. Resultados obtenidos en ensayo de válvulas.

Anexo III. Características técnicas de los equipos y componentes.

Anexo IV. Características técnicas de la instrumentación.

# ANEXO I. Ensayo experimental de la válvula de regulación SAUTER VUN 015 según la Norma UNE-EN: 1267:2012

## 1. Objetivo

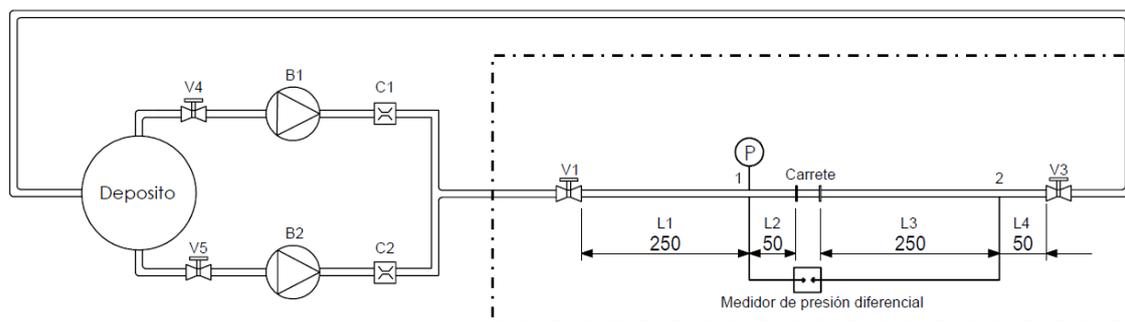
El objetivo de este informe es determinar de forma experimental el coeficiente de pérdidas de presión en función de la tensión eléctrica aplicada, en las válvulas de regulación SAUTER VUN 025 y BUN 025, utilizadas en la instalación “Banco de ensayo de intercambiadores para almacenamiento de energía solar térmica (TES) utilizando materiales de cambio de fase (PCM)” según la norma UNE-EN: 1267:2012.

## 2. Instalación experimental

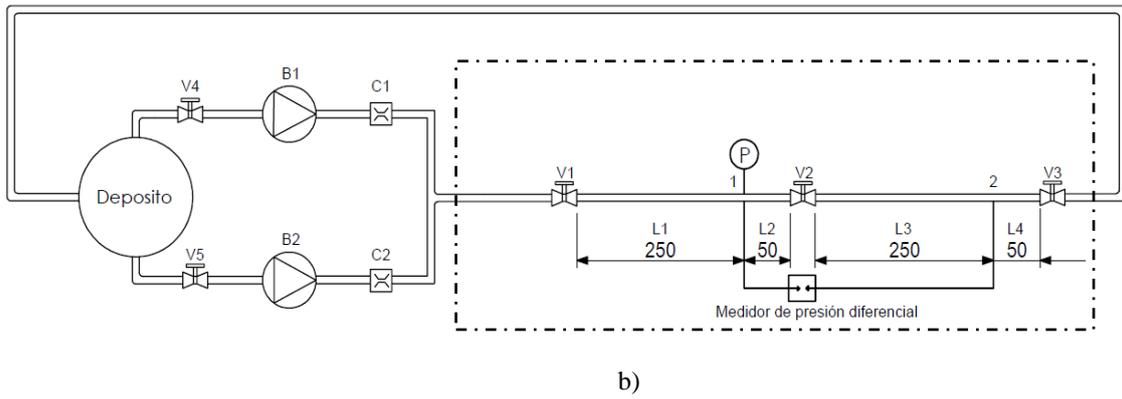
### 2.1 Esquema general del circuito hidráulico

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente el montaje experimental para la obtención del coeficiente de caudal de la válvula a ensayar, según la norma UNE-EN: 1267:2012.

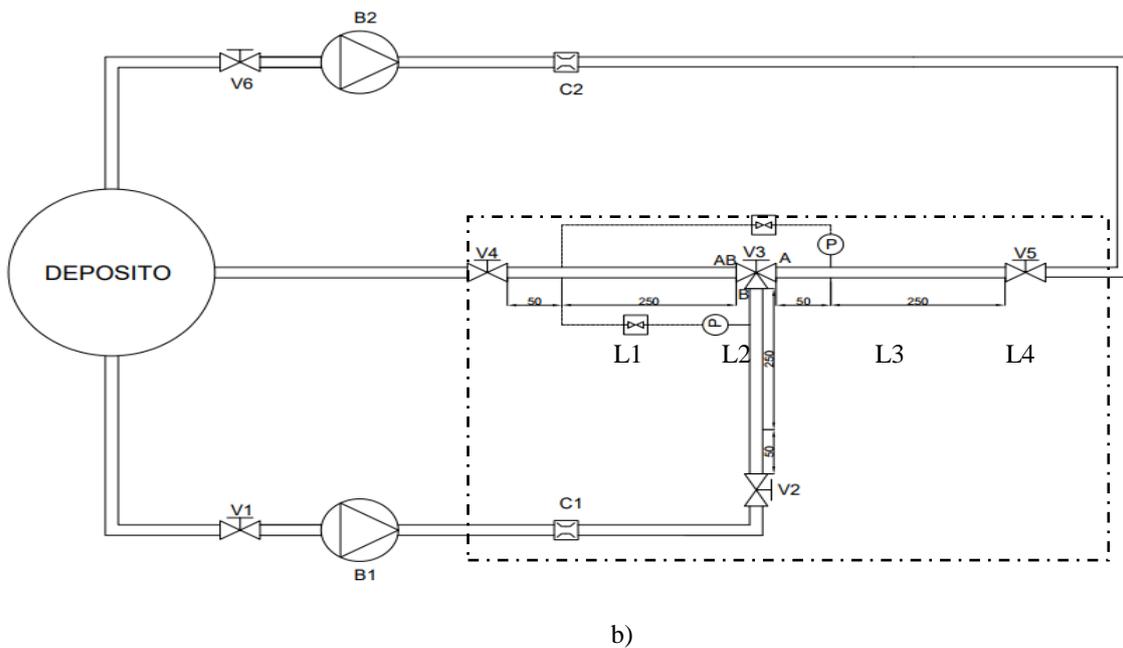
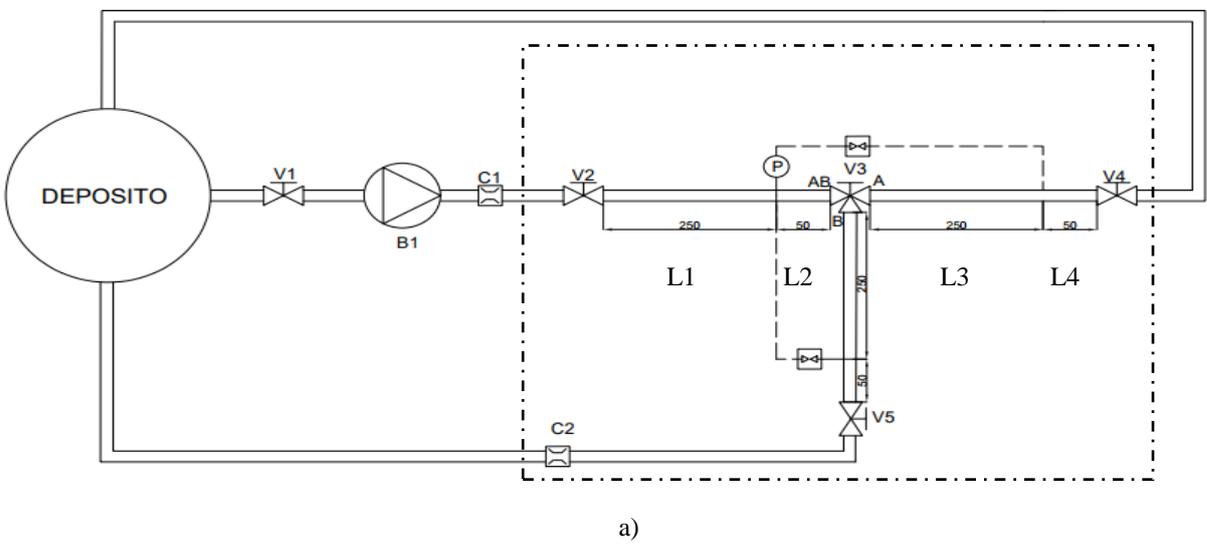
Las válvulas a caracterizar experimentalmente son de diámetro nominal 25 mm (DN25), por lo que la sección de ensayo de la instalación debe ejecutarse en tubería de cobre de 25 mm de diámetro. En este tramo de ensayo se montará el elemento a ensayar, el tramo recto equivalente para la caracterización previa de las pérdidas de presión del sistema, y la instrumentación para medida de la presión de entrada, y la diferencia de presiones en la válvula a ensayar. El resto de infraestructura; depósito, bombas centrífugas, válvula de regulación, y medidores de caudal, ya existe en el laboratorio de Ingeniería de Fluidos del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena.



a)



**Figura 1.** Instalación para la caracterización experimental del coeficiente de caudal de válvulas 2 vías, según la norma UNE-EN: 1267:2012. a) Montaje previo sin válvula, b) Montaje con válvula a ensayar.



**Figura 2.** Instalación para la caracterización experimental del coeficiente de caudal de válvulas 3 vías, según la norma UNE-EN: 1267:2012. a) Función divisora, b) Función de control.

Nota: Las longitudes se miden a partir de los extremos de las tuberías, y el líquido de ensayo debe ser agua, cuya temperatura este comprendida entre 5 y 40° C.

Simbología:

**C1, C2:** Caudalímetros electromagnéticos

**B1, B2:** Bombas centrífugas DELTA50 JM 230 50 14075/STD.

**V2:** Válvula a caracterizar experimentalmente

**V1, V3:** Válvulas de regulación

**1:** Sección de medida de la presión aguas arriba de la válvula a ensayar

**2:** Sección de medida de la presión aguas debajo de la válvula a ensayar

**L1, L3:** Tramos de tubo recto aguas arriba, y aguas abajo, de la válvula a ensayar. Deben tener una longitud igual o superior a 10 veces al diámetro de la tubería

**L2, L4:** Tramos de tubo recto aguas arriba, y aguas abajo, de la válvula a ensayar. Deben tener una longitud igual o superior a 2 veces al diámetro de la tubería (si se utiliza estabilizador de flujo, L1 puede ser inferior a 10D)

En la Tabla siguiente se indica el diámetro nominal de la tubería a utilizar, en función del diámetro nominal de la válvula a ensayar.

Diámetro nominal de la válvula DN	Diámetro nominal de la tubería mm
8	10 × 0,8
10	12 × 1,0
15	15 × 1,0
15/20	18 × 1,0
20	22 × 1,0
25	28 × 1,5
32	35 × 1,5
40	42 × 1,5
50	54 × 1,5

**Tabla 1.** Diámetro de la tubería de cobre a utilizar en función del DN de la válvula a ensayar, según UNE-EN: 1267:2012.

## 2.2 Componentes

### 2.2.1 Bomba

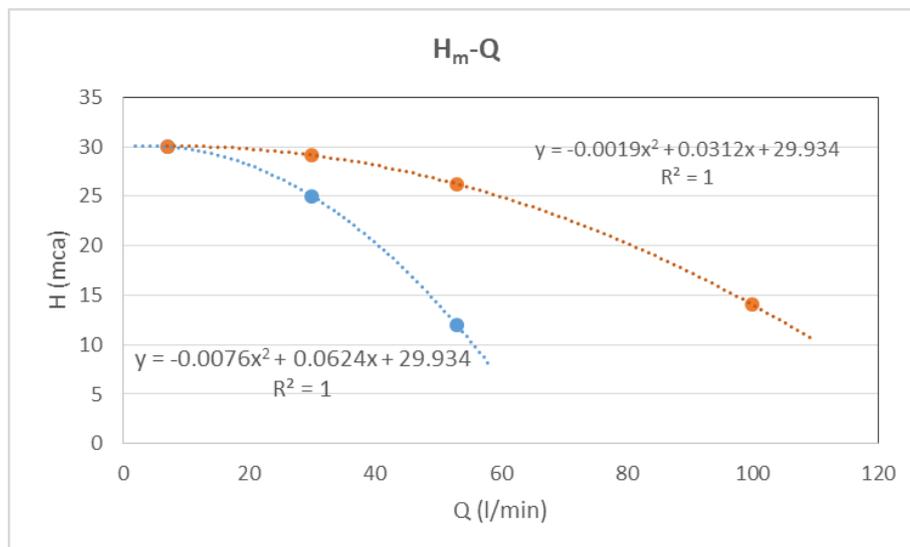
El agua será impulsada a la sección de ensayo mediante dos electrobombas centrifugas de alimentación trifásica con las siguientes características:

Modelo	Delta 505M
Caudal	Entre 7 y 53 l/min
Altura manométrica	Entre 30 y 12 m.c.a
Alimentación eléctrica	Trifásica 230 V
Potencia máxima	0.6 kW

**Tabla 2.** Placa de características de la bomba centrífuga



**Figura 3.** Bomba centrífuga de impulsión



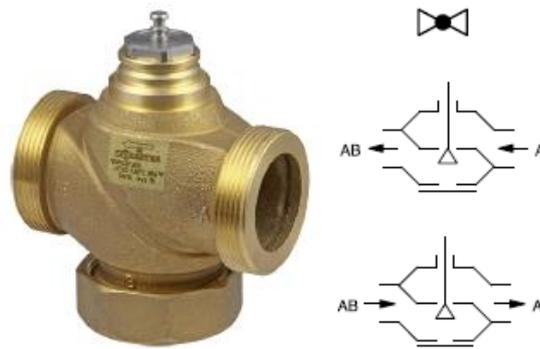
**Figura 4.** Curvas características del grupo de bombeo

### 2.2.2 Válvulas a ensayar

Las válvulas a ensayar son de tipo de asiento para regulación del caudal que circulará por las distintas tuberías de la instalación experimental. Es importante conocer en detalle como varía el coeficiente de caudal de estas válvulas en función de la tensión aplicada (entre 0 y 24 VDC), ya que, al haber varias válvulas en la instalación, y además al tratarse

de un circuito cerrado, las pérdidas en las válvulas van a ser una parte importante de las pérdidas totales en el circuito, y, por tanto, influyen sustancialmente en la selección de la bomba.

Se tratan de válvulas de dos y tres vías de la marca SAUTER, modelo VUN 025 y BUN 025, respectivamente. A continuación, se detalla las principales características de estos dos tipos de válvulas



### **VUN: 2-way valve with male thread, PN 16**

#### **How energy efficiency is improved**

Reliable actuation in efficient control systems

#### **Features**

- Regulating valve free of silicone grease with male thread (DIN EN ISO 228-1) for cold or hot water in closed and open circuits
- In combination with valve actuators AVM 105(S), 115(S), 321(S) and AVF 124, 125S as a control unit
- Equal-percentage (F300) / linear (F200) characteristic, can be set with SUT valve actuators (SAUTER Universal Technology)
- The valve is closed when the spindle is moved out
- Closing procedure against the pressure or with the pressure
- Stainless-steel spindle
- Valve body and valve seat in dezincification-resistant (DZR) cast brass
- Plug with glass-fibre-reinforced PTFE sealing ring made of dezincification-resistant (DZR) cast brass
- Stuffing box with wiper ring made of dezincification-resistant (DZR) cast brass and double O-ring seal made of EPDM

**Figura 5.** Válvula SAUTER modelo VUN 025 a caracterizar experimentalmente.

Overview of types				
Type	Nominal diameter	$K_{Vg}$ value	Connection	Weight
VUN015F350	DN 15	0.4 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
VUN015F340	DN 15	0.63 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
VUN015F330	DN 15	1 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
VUN015F320	DN 15	1.6 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
VUN015F310	DN 15	2.5 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
VUN015F300	DN 15	4 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
VUN020F300	DN 20	6.3 m <sup>3</sup> /h	G1¼" B	1 kg
VUN025F300	DN 25	10 m <sup>3</sup> /h	G1½" B	1.3 kg
VUN032F300	DN 32	16 m <sup>3</sup> /h	G2" B	1.74 kg
VUN040F300	DN 40	22 m <sup>3</sup> /h	G2¼" B	2.52 kg
VUN050F300	DN 50	28 m <sup>3</sup> /h	G2¾" B	3.44 kg
VUN050F200	DN 50	40 m <sup>3</sup> /h	G2¾" B	3.44 kg

## Technical data

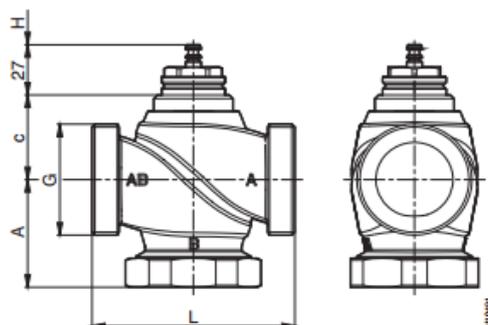
### Parameters

Nominal pressure	16 bar
Control ratio	> 50:1
Valve characteristic	F200 = linear F3°0 = equal percentage
Nominal stroke	8 mm
Leakage rate	≤ 0.02% of $K_{Vg}$ value

### Ambient conditions

Operating temperature <sup>1)</sup>	-15...150 °C
Operating pressure up to 120 °C	16 bar
Operating pressure up to 130 °C	13 bar
Operating pressure up to 150 °C	10 bar

### Dimension drawing



DN	A	c	L	H	G
15	58.5	45.5	100	8	G 1"
20	58.0	38.5	100	8	G 1¼"
25	60.7	42.5	105	8	G 1½"
32	62.5	45.5	105	8	G 2"
40	75.0	59.0	130	8	G 2¼"
50	87.0	67.5	150	8	G 2¾"

**Figura 6.** Características técnicas y dimensiones de la válvula VUN 025 a estudiar

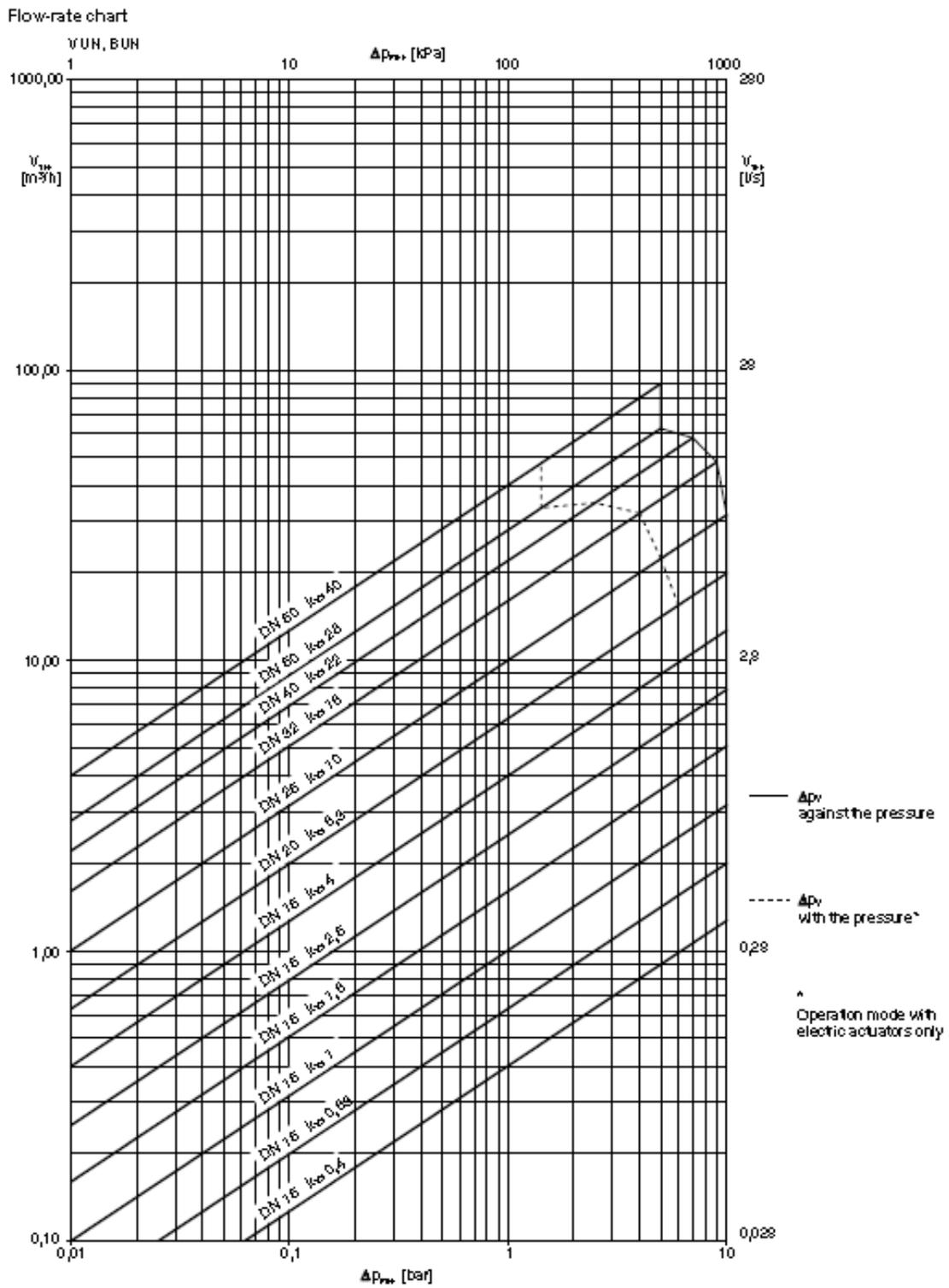


Figura 7. Curvas características  $\Delta p - Q$  de la válvula VUN025 a estudiar

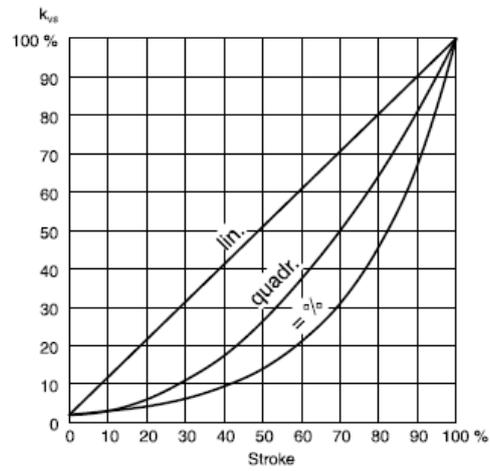
### Characteristic for actuators with positioner

On actuator AVM 105S, AVM 115S or AVM 321S

Equal-percentage/linear

On actuator AVF 125S

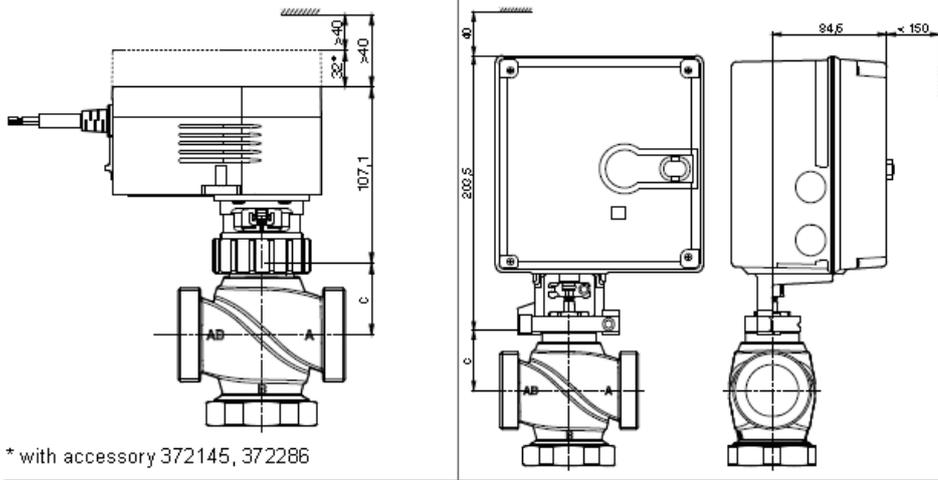
Equal-percentage/linear/quadratic



### Combinations

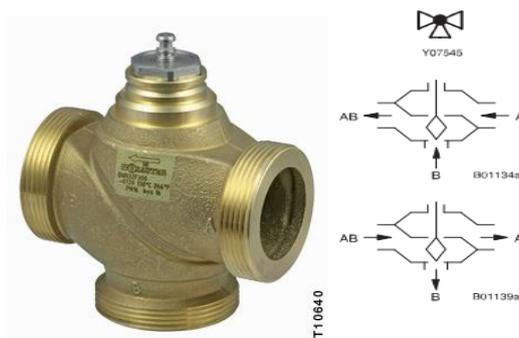
AVM 105(S), 115(S)

AVF 124, 125 S



\* with accessory 372145, 372286

Figura 8. Curvas características de la válvula a estudiar en función del tipo de actuador



## BUN: 3-way valve with male thread, PN 16

### How energy efficiency is improved

Reliable actuation in efficient control systems

### Features

- Regulating valve free of silicone grease with male thread (DIN EN ISO 228-1) for cold and hot water in closed and open circuits
- In combination with valve actuators AVM 105(S), 115(S), 321(S) and AVF 124, 125S as a control unit
- Equal-percentage (F300) / linear (F200) characteristic, can be set with SUT valve actuators (SAUT-ER Universal Technology)
- The valve is closed when the spindle is moved out
- Can be used as a control valve or a distribution valve
- Stainless-steel spindle
- Valve body with valve seat made from dezincification-resistant cast brass (DZR)
- Plug with glass-fibre-reinforced PTFE sealing ring made from dezincification-resistant cast brass (DZR)
- Stuffing box with wiper ring made from dezincification-resistant cast brass (DZR) and double O-ring seal made from EPDM

Figura 9. Válvula SAUTER modelo BUN 025 a caracterizar experimentalmente

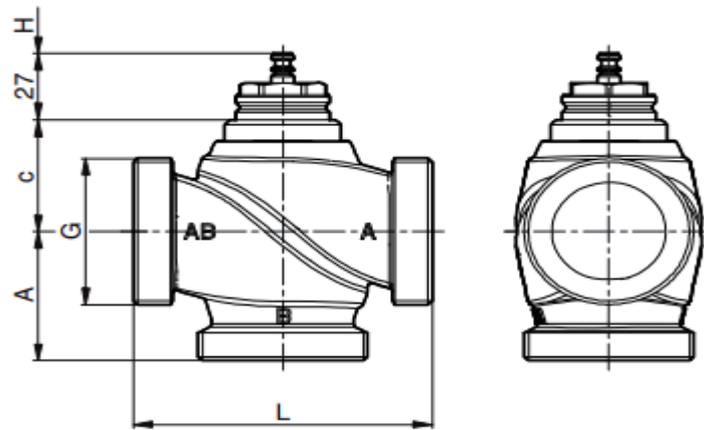
### Technical data

Parameters	
Nominal pressure	16 bar
Valve characteristic, control passage	F200 = linear F3*0 = equal percentage
Valve characteristic, mixing passage	Linear
Control ratio	> 50:1
Leakage rate, control passage	≤ 0.05% of $K_{VS}$ value
Leakage rate, mixing passage	≤ 1% of $K_{VS}$ value
Nominal stroke	8 mm
Ambient conditions	
Operating temperature <sup>1)</sup>	-15...150 °C
Operating pressure up to 120 °C	16 bar
Operating pressure up to 130 °C	13 bar
Operating pressure up to 150 °C	10 bar

Overview of types				
Type	Nominal diameter	$K_{VS}$ value	Connection	Weight
BUN015F330	DN 15	1 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
BUN015F320	DN 15	1.6 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
BUN015F310	DN 15	2.5 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
BUN015F300	DN 15	4 m <sup>3</sup> /h	G1" B	0.82 kg
BUN020F300	DN 20	6.3 m <sup>3</sup> /h	G1¼" B	1 kg
BUN025F300	DN 25	10 m <sup>3</sup> /h	G1½" B	1.3 kg
BUN032F300	DN 32	16 m <sup>3</sup> /h	G2" B	1.74 kg
BUN040F300	DN 40	22 m <sup>3</sup> /h	G2¼" B	2.52 kg
BUN050F300	DN 50	28 m <sup>3</sup> /h	G2¾" B	3.44 kg
BUN050F200	DN 50	40 m <sup>3</sup> /h	G2¾" B	3.44 kg

Figura 10. Características técnicas BUN 025 a estudiar

**Dimension drawing**



DN	A	c	L	H	G
15	50,0	45,5	100	8	G 1"
20	50,0	38,5	100	8	G 1¼"
25	52,5	42,5	105	8	G 1½"
32	52,5	45,5	105	8	G 2"
40	65,0	59,0	130	8	G 2¼"
50	75,0	67,5	150	8	G 2¾"

**Figura 11.** Dimensiones de la válvula BUN 025 a estudiar

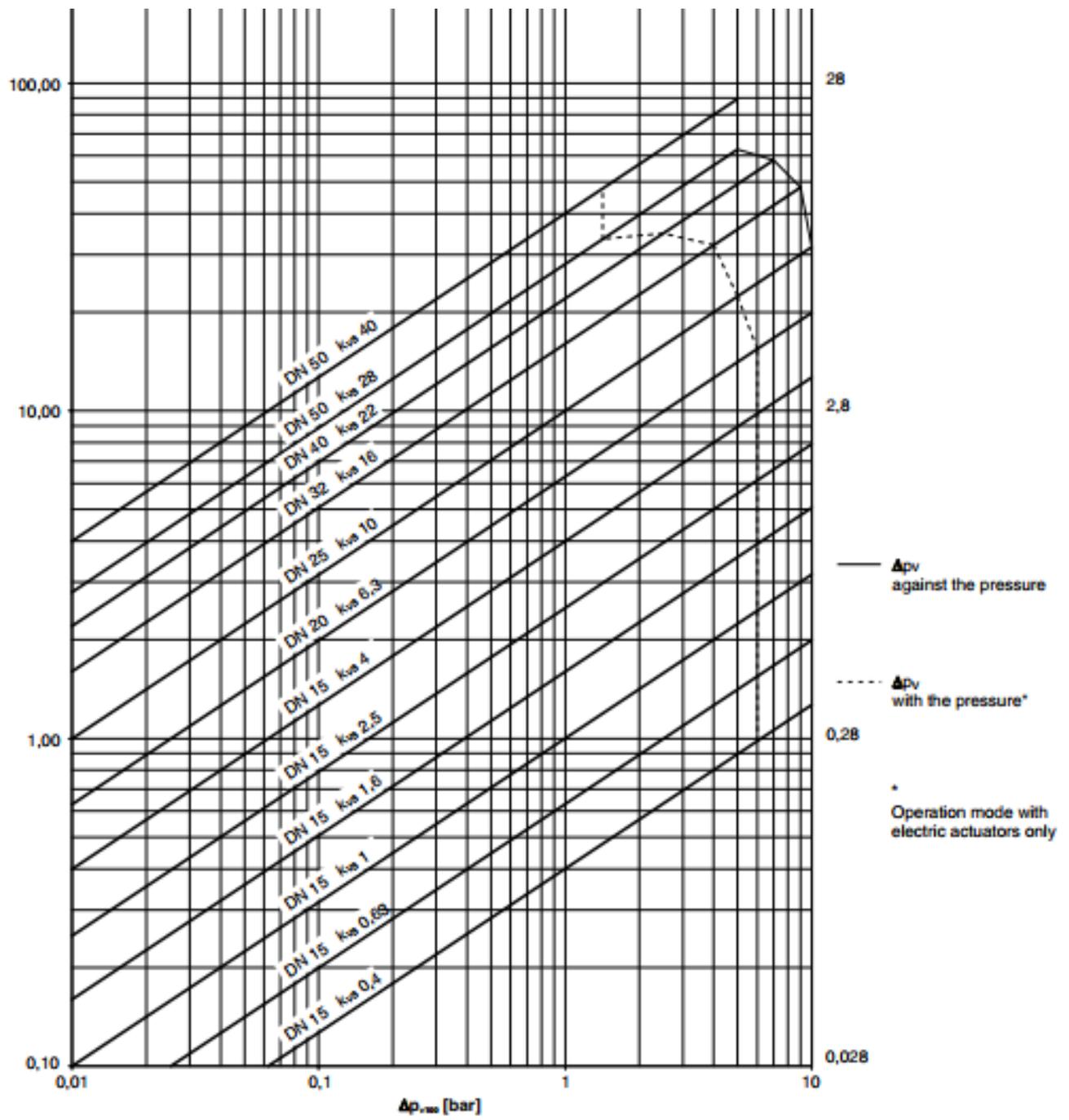
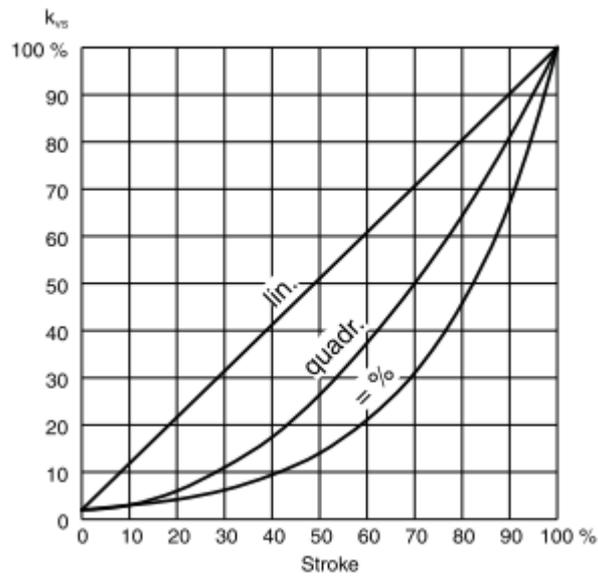


Figura 12. Curvas características  $\Delta p - Q$  de la válvula BUN025 a estudiar



AVF 124, 125S

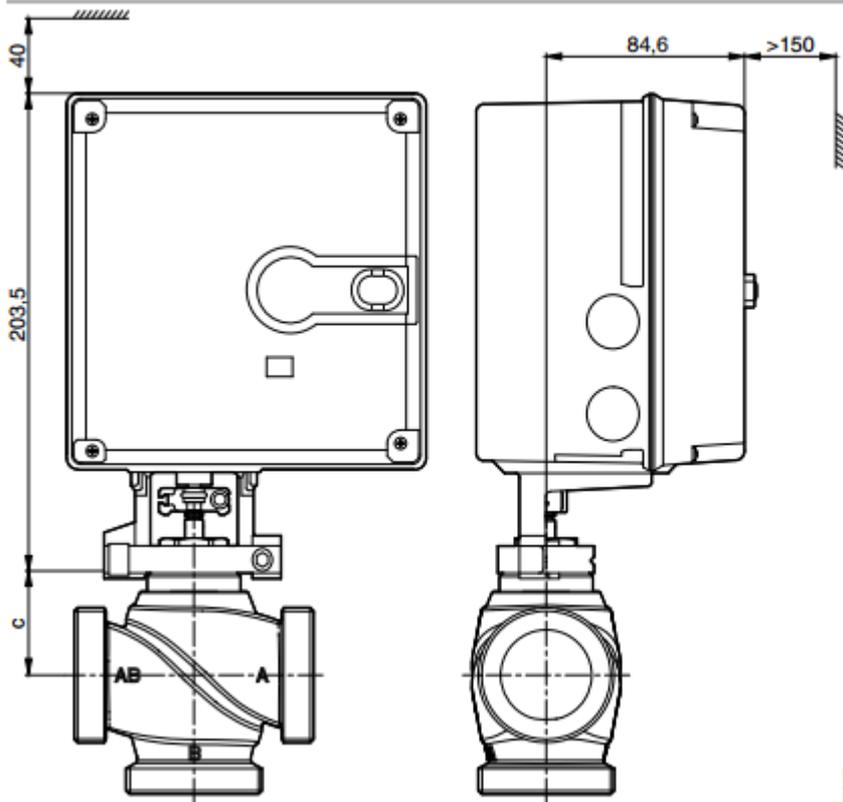


Figura 13. Curvas características de la válvula a estudiar en función del tipo de actuador

### 2.2.3 Depósito

La instalación dispone de un depósito abierto a la atmósfera del que aspiran las dos bombas, y al que descargan, tanto el by-pass de cada bomba, como el colector de ensayo de la válvula.

### 2.2.4 Carrete

Se montará un carrete, de la misma longitud que la válvula a ensayar, para facilitar el montaje y desmontaje de válvulas a ensayar, y para caracterizar las pérdidas en el conducto, o colector de ensayo, previamente a ensayar la válvula en estudio.



Figura 14. Instalación experimental con carrete

## 2.3 Instrumentación

Los elementos de medida que se utilizan en el ensayo son:

- Dos caudalímetros electromagnéticos Endress+Hausser DN15, mediante los que se mide el caudal volumétrico que proporciona cada bomba.
- Un medidor de presión relativa para medir la presión en la entrada del conducto de ensayo. Es un manómetro elástico de tubo Bourdon de rango 0- bar(rel), clase 0,5%.
- Un medidor de presión diferencial digital portátil de rango 0-2 bar, para medir la pérdida de presión entre las tomas situadas, según la norma, aguas arriba y aguas abajo de la válvula a caracterizar.



**Figura 15.** Caudalímetro electromagnético Endress+Hauser DN 15

Según la norma, la incertidumbre de las mediciones debe ser del 2% del valor medido, ara estas tres variables. Por último, la temperatura del agua debe medirse con una exactitud de  $\pm 1^\circ \text{C}$ , con objeto de verificar que se encuentra dentro del rango de variación permitido, según norma.

El diámetro de las tomas de presión se especifica en la tabla siguiente, debiendo ser el eje del orificio de toma de presión, perpendicular al eje de la tubería. En nuestro caso, como el diámetro de tubería es de 25 mm, el de la toma debe estar comprendido entre 2 y 3 mm. Para acoplar el medidor de presión se utilizarán collarines comerciales, como el indicado en la siguiente figura, en la que se adjunta el procedimiento de montaje.

DN	Mínimo mm	Máximo mm
< 20	1,5	2
20 a 50	2	3
> 50	3	5

**Tabla 3.** Diámetro de los orificios para la toma de presión según Norma UNE-EN: 1267:2012





**Figura 16.** Detalle de montaje de los collarines para medida de la presión

### 2.3.1 Fluctuaciones admisibles en las mediciones

La amplitud admisible de las fluctuaciones de cada valor medido se indica en las tablas siguientes, en función del valor del coeficiente de pérdidas, o coeficiente de resistencia,  $\zeta$  de la válvula a ensayar.

a) Fluctuaciones en la presión diferencial

Valor de $\zeta$	Fluctuaciones de $\Delta p$ %
$\zeta > 20$	$\pm 6$
$4 < \zeta \leq 20$	$\pm 10$
$1 < \zeta \leq 4$	$\pm 17$
$0,1 \leq \zeta \leq 1$	$\pm 26$

**Tabla 4.** Fluctuación permitida en la medida de la presión diferencial según Norma UNE-EN: 1267:2012

b) Fluctuaciones en el caudal y en la presión de entrada

Cantidad	Símbolo	Fluctuaciones %
Tasa de caudal	$e_q$	$\pm 6$
Presión aguas arriba	$e_p$	$\pm 6$

**Tabla 5.** Fluctuación permitida en la medida de la presión de entrada y el caudal según Norma UNE-EN: 1267:2012

### 2.3.2 Pérdida de presión en las tuberías

Para eliminar la pérdida de carga asociada a las tuberías se debe, para cada diámetro nominal de la tubería de ensayo, conectar de manera concéntrica cada una de ellas, y eliminando previamente las bolsas de aire atrapadas, registrar una serie de valores de caudales, y sus pérdidas de presión asociadas, dentro de la misma gama de caudales de funcionamiento utilizados para el ensayo de la válvula.

A partir de estos datos de caudales y pérdidas de presión, se debe determinar la relación entre ambos en la tubería de ensayo. Cuando el coeficiente de resistencia de la válvula sea

bajo, se recomienda medir, en el mismo programa de ensayo, las pérdidas de presión en las tuberías, y la pérdida de carga de conjunto válvula-tubería, con la misma configuración, y con los mismos dispositivos de medición.

Si el coeficiente de resistencia de la válvula es alto, se pueden utilizar otros métodos para medir las pérdidas de presión en las tuberías de ensayo para que la incertidumbre sea la adecuada.

### 3. Procedimiento de ensayo y cálculos a realizar

El procedimiento a seguir para caracterizar el coeficiente de resistencia de la válvula consta de los siguientes pasos:

- a) Verificar la instrumentación de la instalación
- b) Montar el carrete en la instalación sustituyendo la válvula a ensayar
- c) Purgar el aire de la instalación de ensayo
- d) Hacer circular diferentes caudales, en el rango de medida de la válvula, y medir las pérdidas de presión en el conducto de ensayo
- e) Obtener una correlación adecuada entre el caudal y las pérdidas de presión por fricción en el conducto de ensayo
- f) Sustituir el carrete por la válvula a ensayar, y verificar nuevamente la instrumentación
- g) Para diferentes tensiones de alimentación de la válvula (entre 0 y 10 VDC) hacer circular diferentes caudales, y medir la pérdida de presión en el conducto de ensayo.
  - Empezando con la válvula totalmente abierta (tensión de alimentación 10 VDC) hacer circular 6 caudales diferentes, escalonados linealmente, según el rango de operación de las bombas. Establecer el máximo caudal disponible e ir reduciéndolo progresivamente.
  - Reducir la tensión de alimentación de la válvula en 2 VDC, y repetir la medida de la pérdida de presión para diferentes caudales en el rango de operación de las bombas. Establecer el máximo caudal disponible e ir reduciéndolo progresivamente.
  - Repetir las medidas reduciendo la tensión hasta 4 VDC
  - Repetir las medidas incrementando ahora la tensión de alimentación hasta 24 VDC.
- h) Obtener el coeficiente de resistencia de la válvula  $\xi$  (adimensional) a partir de la medida de la diferencia de presión global medida en el conducto de ensayo  $\Delta p_{v+t}$ .

Para ello, en primer lugar, se obtiene la pérdida de presión correspondiente a la válvula  $\Delta p_v$ , restando a esta pérdida de presión total, la medida en con el carrete colocado en sustitución de la válvula  $\Delta p_t$ .

$$\Delta p_v = \Delta p_{v+t} - \Delta p_t$$

Hay que tener en cuenta que tanto  $\Delta p_{v+t}$  como  $\Delta p_t$  deben correlacionarse con el caudal medido mediante una expresión de tipo cuadrático de la forma,

$$\Delta p_t = aQ^2$$

$$\Delta p_{v+t} = bQ^2$$

Por otro lado, la densidad del agua es función de la temperatura del agua. Para el rango de temperaturas (en °C entre 0 y 50) de ensayo se puede utilizar la siguiente correlación,

$$\rho = 1000,142857 + 0,0042857 t - 0,005 t^2$$

El coeficiente de resistencia al flujo de la válvula (adimensional) es la pérdida de presión en la válvula adimensionalizada con la presión dinámica (todas las variables se expresan en unidades del SI).

$$\xi = \frac{2\Delta p_v}{\rho U^2} = \frac{\pi^2 \Delta p_v D^4}{8 \rho Q^2}$$

Los datos del coeficiente de resistencia al flujo obtenidos para cada caudal de ensayo, para una tensión de alimentación dada, dependerán del número de Reynolds, aunque si este es suficientemente alto, el coeficiente será prácticamente constante, pudiéndose obtener un valor promedio  $\xi_{m(Vi)}$ . Repitiendo el ensayo para las diferentes tensiones aplicadas (promedio entre subiendo y bajando tensión), se obtendrá la correlación buscada entre el coeficiente de resistencia, y la tensión de alimentación  $\xi_m = f(V)$

- i) Obtener el coeficiente de caudal de la válvula  $k_{vi}$  (dimensional, en m<sup>3</sup>/h - bar) para los diferentes caudales y un valor dado de la tensión de alimentación, despejando de  $Q = k_v \sqrt{\Delta p_v}$ .

$$k_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_v \rho_0}}$$

siendo,  $\rho$  la densidad del agua, en kg/m<sup>3</sup>, a la temperatura de ensayo, y  $\rho_0$  la densidad del agua a la temperatura de referencia de 15°C.

Obtener, promediando los resultados para una tensión de alimentación dada (subiendo y bajando), el coeficiente de caudal promedio  $k_{vm}$  correspondiente a dicha tensión de alimentación.

Finalmente obtener la correlación buscada entre el coeficiente de caudal, y la tensión de alimentación  $k_{vm} = f(V)$

## Anexo. Características técnicas de la instrumentación

### I.1 Caudalímetros



DN		Minimum full scale value (scaling at v ~0.3 m/s)	Factory setting full scale value (scaling at v ~2.5 m/s)	Maximum full scale value (scaling at v ~10 m/s)
[mm]	[inch]			
15	1/2"	0.1909 m <sup>3</sup> /h	1.5904 m <sup>3</sup> /h	6.3617 m <sup>3</sup> /h
25	1"	0.5310 m <sup>3</sup> /h	4.4179 m <sup>3</sup> /h	17.671 m <sup>3</sup> /h
32	1 1/4"	0.8686 m <sup>3</sup> /h	7.2382 m <sup>3</sup> /h	28.953 m <sup>3</sup> /h
40	1 1/2"	1.3572 m <sup>3</sup> /h	11.310 m <sup>3</sup> /h	45.239 m <sup>3</sup> /h
50	2"	2.1206 m <sup>3</sup> /h	17.671 m <sup>3</sup> /h	70.686 m <sup>3</sup> /h
65	2 1/2"	3.5838 m <sup>3</sup> /h	29.865 m <sup>3</sup> /h	119.46 m <sup>3</sup> /h
80	3"	5.4287 m <sup>3</sup> /h	45.239 m <sup>3</sup> /h	180.96 m <sup>3</sup> /h
100	4"	8.4823 m <sup>3</sup> /h	70.686 m <sup>3</sup> /h	282.74 m <sup>3</sup> /h
125	5"	13.254 m <sup>3</sup> /h	110.45 m <sup>3</sup> /h	441.79 m <sup>3</sup> /h
150	6"	19.085 m <sup>3</sup> /h	159.04 m <sup>3</sup> /h	636.17 m <sup>3</sup> /h
200	8"	33.929 m <sup>3</sup> /h	282.74 m <sup>3</sup> /h	1131.0 m <sup>3</sup> /h
250	10"	53.014 m <sup>3</sup> /h	441.79 m <sup>3</sup> /h	1767.1 m <sup>3</sup> /h
300	12"	76.341 m <sup>3</sup> /h	636.17 m <sup>3</sup> /h	2544.7 m <sup>3</sup> /h
350	14"	103.91 m <sup>3</sup> /h	865.90 m <sup>3</sup> /h	3463.6 m <sup>3</sup> /h
400	16"	135.72 m <sup>3</sup> /h	1131.0 m <sup>3</sup> /h	4523.9 m <sup>3</sup> /h
450	18"	171.77 m <sup>3</sup> /h	1431.4 m <sup>3</sup> /h	5725.6 m <sup>3</sup> /h
500	20"	212.06 m <sup>3</sup> /h	1767.1 m <sup>3</sup> /h	7068.6 m <sup>3</sup> /h
600	24"	305.36 m <sup>3</sup> /h	2544.7 m <sup>3</sup> /h	10179 m <sup>3</sup> /h

1 m<sup>3</sup> = 1000 litres

## I.2 Medidor de presión de entrada

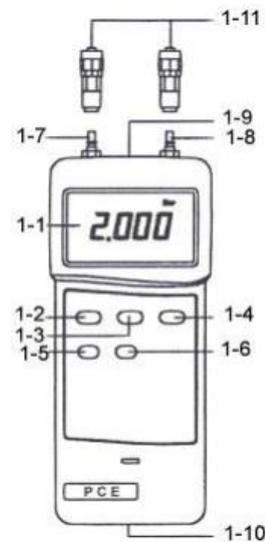
Código	Ø	Conexión	Ø x Rosca	Rango/PN	Emb. U. / G.
6053140200	63	vertical	1/4	-1...+1,5 bar	1 / 50
6053140300	63	vertical	1/4	-1... +3 bar	1 / 50
6053140800	63	vertical	1/4	-76...0 cmHg	1 / 50
6053140801	63	vertical	1/4	-1...0 bar	1 / 50
6053140900	63	vertical	1/4	0 ... 0,6 bar	1 / 50



## I.3 Medidor de presión diferencial



- 1-1 Pantalla / Indicador
- 1-2 Botón de encendido / apagado
- 1-3 Tecla HOLD
- 1-4 Tecla de puesta a cero
- 1-5 Tecla MAX / MIN
- 1-6 Tecla de selección de unidades
- 1-7 Toma del adaptador para tubos 1
- 1-8 Toma del adaptador para tubos 2
- 1-9 Conexión para la interfaz RS 232
- 1-10 Compartimento de la batería
- 1-11 Clavija para la adaptación de los tubos



Modelo		PCE 910	PCE 917
PSI	Rango	± 29,00	101,00
	Resolución	0,01	0,05
mbar	Rango	± 2000	± 7000
	Resolución	1	5
inH2O	Rango	± 802,0	± 2800
	Resolución	0,5	2
mH2O	Rango	± 20,40	± 70,00
	Resolución	0,01	0,05
inHg	Rango	± 59,00	± 206,0
	Resolución	0,02	0,1
mmHg	Rango	± 1500	± 5250
	Resolución	1	5
Torr	Rango	-	-
	Resolución	-	-
Pa / kPa	Rango	-	-
	Resolución	-	-
cmH2O	Rango	±2040	±7000
	Resolución	1	5
Kg/cm <sup>2</sup>	Rango	±2,040	7,000
	Resolución	0,001	0,005
Precisión		± 2 % (en todo el rango)	
Reproducibilidad		± 1 %	
Cuota de medición		0,8 s	
Min Max Peak Hold		si	
Interfaz		RS 232	
Alimentación		1 batería de bloque de 9 V PP3	
Material de la carcasa		plástico	
Dimensiones de la		180 x 72 x 32 mm	
Peso		345 g	

Característica	Valor
<b>Todas las versiones:</b>	
Parámetros de medición:	Presión (hPa, kPa, psi, inH <sub>2</sub> O, mmHg, inHg, mmH <sub>2</sub> O, Solo para las versiones de 2hPa, 20hPa, 200hPa: Pa) Temperatura (°C, °F) Solo para las versiones de 2hPa, 20hPa, 200hPa: Velocidad (m/s, fpmx100)
Temperatura de trabajo	0...+60°C/32...+140°F
Resolución de la temperatura	0.1°C/ 0.1°F
Temperatura func.	0...+60°C / 32...+140°F
Temperatura almac.	-10...+70°C / 14...+158°F
Exactitud en presión	0,5% del valor final ±1 Dígito (22.0°C/71.6°F)
Exactitud en temperatura	±3°C / 5,4°F ±1 Digit
Medio de medición	Gases no agresivos
Intervalo de med.	2/s
Alimentación	1x pila/pila recargable bloque 9V
Vida de la pila	aprox. 120h (Iluminación del visual. apagada)
Clase de protección	con TopSafe (accesorio) y mangueras de presión conectadas: IP65
Directriz CE	89/336/EEC
Garantía	2 años
<b>Versión 2hPa:</b>	
Rango med. presión	0...+2hPa
Resolución presión	0.001hPa
Sobrepresión	±10hPa
Rango med. velocidad	2...17.5m/s, 3.95...34.45fpm
Resolución velocidad	0.1m/s, 0.1fpmx100
<b>Versión 20hPa:</b>	
Rango med. presión	0...+20hPa
Resolución presión	0.01hPa

## Anexo II. Resultados obtenidos en ensayo de válvulas.

### II.1 Resultados obtenidos válvula de dos vías.

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
900	21,270	30,558	76394,373	0,447	0,623
700	13,590	23,767	59417,845	0,473	0,606
500	6,390	16,977	42441,318	0,436	0,631
350	3,280	11,884	29708,923	0,456	0,617
250	1,570	8,488	21220,659	0,428	0,637
150	0,560	5,093	12732,395	0,424	0,640
PROMEDIO				<b>0,444</b>	<b>0,626</b>

**Tabla 1.** Resultado tensión 10V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
900	22,270	30,558	76394,373	0,469	0,609
700	13,300	23,767	59417,845	0,463	0,613
500	6,820	16,977	42441,318	0,465	0,611
350	3,390	11,884	29708,923	0,472	0,607
250	1,700	8,488	21220,659	0,464	0,612
150	0,590	5,093	12732,395	0,447	0,623
PROMEDIO				<b>0,463</b>	<b>0,613</b>

**Tabla 2.** Resultados tensión 9V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
850	22,410	28,860	72150,241	0,529	0,573
700	14,690	23,767	59417,845	0,511	0,583
550	8,910	18,674	46685,450	0,502	0,588
400	5,180	13,581	33953,055	0,552	0,561
250	1,900	8,488	21220,659	0,518	0,579
150	0,690	5,093	12732,395	0,523	0,577
PROMEDIO				<b>0,522</b>	<b>0,577</b>

**Tabla 3.** Resultados tensión 8V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
700	19,690	23,767	59417,845	0,685	0,504
600	14,550	20,372	50929,582	0,689	0,502
500	9,420	16,977	42441,318	0,642	0,520
400	6,260	13,581	33953,055	0,667	0,510
200	1,500	6,791	16976,527	0,639	0,521
100	0,570	3,395	8488,264	0,971	0,423
PROMEDIO				<b>0,715</b>	<b>0,497</b>

**Tabla 4.** Resultados tensión 7V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
600	23,900	20,372	50929,582	1,131	0,392
500	16,620	16,977	42441,318	1,133	0,392
400	10,540	13,581	33953,055	1,123	0,393
300	5,910	10,186	25464,791	1,119	0,394
200	2,190	6,791	16976,527	0,933	0,431
100	0,710	3,395	8488,264	1,210	0,379
PROMEDIO				<b>1,108</b>	<b>0,397</b>

**Tabla 5.** Resultados tensión 6V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
400	22,740	13,581	33953,055	2,422	0,268
350	17,280	11,884	29708,923	2,404	0,269
300	12,520	10,186	25464,791	2,371	0,271
250	8,910	8,488	21220,659	2,429	0,267
150	3,570	5,093	12732,395	2,704	0,253
100	1,500	3,395	8488,264	2,556	0,261
PROMEDIO				<b>2,481</b>	<b>0,265</b>

**Tabla 6.** Resultados tensión 5V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
300	22,490	10,186	25464,791	4,258	0,202
260	17,570	8,828	22069,485	4,429	0,198
220	12,990	7,470	18674,180	4,574	0,195
180	8,570	6,112	15278,875	4,508	0,196
140	5,210	4,753	11883,569	4,530	0,196
100	2,850	3,395	8488,264	4,857	0,189
PROMEDIO				<b>4,526</b>	<b>0,196</b>

**Tabla 7.** Resultados tensión 4V

Q (l/h)	$\Delta p v$ (mca)	v (m/s)	Re	$\xi$	kv
220	23,630	7,470	18674,180	8,320	0,144
180	16,380	6,112	15278,875	8,615	0,142
140	9,980	4,753	11883,569	8,677	0,141
100	5,320	3,395	8488,264	9,066	0,138
60	2,220	2,037	5092,958	10,509	0,129
30	0,580	1,019	2546,479	10,982	0,126
PROMEDIO				<b>9,362</b>	<b>0,137</b>

**Tabla 8.** Resultados tensión 3V

## ANEXO II.2 RESULTADOS VÁLVULA TRES VÍAS FUNCIÓN DIVISORA.

QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	AP AB-A (mca)	AP AB-B (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
312	312	0	2,350	2,350	0,411	0,650	0	0
200	200	0	1,150	1,150	0,490	0,595	0	0
160	160	0	0,800	0,800	0,533	0,571	0	0
78	78	0	0,200	0,200	0,560	0,557	0	0
45	45	0	0,100	0,100	0,842	0,454	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 9.** Resultados tensión 10V

QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	AP AB-A (mca)	AP AB-B (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
325	280	45	5,120	2,500	139,219	0,395	21,039	0,091
213	181	32	3,150	2,250	160,988	0,326	37,445	0,068
159	138	21	2,950	1,850	927,275	0,257	71,489	0,049
78	64	14	0,950	0,850	829,484,	0,210	73,905	0,048
40	34	6	0,350	0,250	848,887	0,183	118,344	0,038

**Tabla10.** Resultados tensión 8V

QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	AP AB-A (mca)	AP AB-B (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
318	164	164	10,200	3,800	6,463	0,164	2,408	0,269
210	108	102	5,150	1,900	7,524	0,152	3,112	0,236
156	81	75	3,300	1,200	8,571	0,142	3,636	0,219
80	43	37	1,150	0,750	10,599	0,128	6,224	0,136
50	34	16	0,750	0,250	11,056	0,125	16,642	0,102

**Tabla 11.** Resultados tensión 6,5V

QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	AP AB-A (mca)	AP AB-B (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
325	28	297	7,000	3,123	152,168	0,034	0,580	0,547
213	18	195	5,000	2,540	262,987	0,026	1,138	0,391
159	14	145	3,520	2,000	304,313	0,024	1,621	0,327
78	6,5	42,0	1,750	0,450	705,863	0,016	4,347	0,200
40	3,5	36,5	1,510	0,402	800,720	0,009	5,117	0,184

**Tabla 12.** Resultados tensión 3V

QAB(l/h)	QA(l/h)	QB(l/h)	AP AB-A (mca)	AP AB-B (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
325	0	325	2,100	1,600	0	0	0,258	0,820
213	0	213	1,350	0,950	0	0	0,357	0,698
159	0	159	1,100	0,700	0	0	0,472	0,607
78	0	78	0,750	0,350	0	0	0,980	0,421
40	0	40	0,650	0,100	0	0	1,065	0,404

**Tabla 13.** Resultados tensión 0V

### ANEXO II.3 RESULTADOS VÁLVULA TRES VÍAS FUNCIÓN DE CONTROL.

QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta p$ B-AB (mca)	$\Delta p$ A-AB (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
0	360	3,000	3,320	0,434	0,633	0	0
0	210	2,920	3,120	0,502	0,588	0	0
0	150	2,850	2,925	0,568	0,553	0	0
0	120	2,800	2,910	0,533	0,571	0	0
0	80	2,302	2,502	0,799	0,466	0	0
0	60	2,450	2,500	0,710	0,495	0	0

**Tabla 14.** Resultados tensión 10V

QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta p$ B-AB (mca)	$\Delta p$ A-AB (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
250	50	2,000	2,500	0,682	0,505	13,633	0,113
175	35	1,500	2,000	1,113	0,395	20,867	0,091
120	30	0,850	1,840	2,178	0,282	16,095	0,104
100	20	0,600	1,200	2,045	0,291	25,562	0,082
65	15	0,500	0,900	3,630	0,219	37,870	0,068
50	10	0,350	0,700	4,772	0,191	59,945	0,054

**Tabla 15.** Resultados tensión 8V

QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta p$ B-AB (mca)	$\Delta p$ A-AB (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
150	160	2,400	2,000	1,515	0,339	1,664	0,323
120	120	2,000	1,850	2,189	0,282	2,367	0,271
100	100	1,750	1,550	2,556	0,261	2,982	0,241
80	80	1,050	0,954	2,530	0,262	2,663	0,255
70	70	0,950	0,850	2,956	0,242	3,304	0,229
60	60	0,750	0,680	3,007	0,271	3,550	0,221

**Tabla 16.** Resultados tensión 5V

QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta p$ B-AB (mca)	$\Delta p$ A-AB (mca)	$\xi_A$	kvA	$\xi_B$	kvB
50	250	1,650	1,800	12,270	0,119	0,450	0,621
35	175	1,400	1,500	20,867	0,091	0,779	0,472
30	120	1,100	1,200	22,722	0,087	1,302	0,365
20	100	0,650	0,800	34,83	0,071	1,108	0,396
15	65	0,350	0,500	37,870	0,068	1,412	0,351
10	50	0,200	0,200	34,083	0,071	1,363	0,357

**Tabla 17.** Resultados tensión 3V

QA(l/h)	QB(l/h)	$\Delta p$ B-AB (mca)	$\Delta p$ A-AB (mca)	$\xi$ B	kvB	$\xi$ A	kv A
0	360	1,900	3,000	0,250	0,834	0	0
0	210	0,650	2,600	0,251	0,832	0	0
0	150	0,350	2,100	0,265	0,809	0	0
0	120	0,250	1,560	0,296	0,766	0	0
0	80	0,120	1,000	0,320	0,737	0	0
0	60	0,085	0,650	0,402	0,657	0	0

**Tabla 14.** Resultados tensión 0V

## Referencias bibliográficas

### Estudios en relación con instalaciones experimentales

- [1] S.D. Sharma, T. Iwata, H. Kitano, K. Sagara, Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit, *Solar Energy* 78 416 – 426
- [2] F. Agyenim, P. Eames, M. Smyth, A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins, *Solar Energy* 83 (2009) 1509-1520
- [3] N. Sharifi, S. Wang, T.L. Bergman, A. Faghri, Heat pipe-assisted melting of a phase change material. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 3448 – 3459
- [4] Oluwaseun S. Alajo, Victor C. Ibekwe, Emmanuel C. Nsofor, Experimental Study on the Performance of a PCM-Based Solar Energy Storage System (2013) 195-203
- [5] Sohif Mat, Abduljalil A. Al-Abidi, K. Sopian , M.Y. Sulaiman , Abdulrahman Th Mohammad, Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins 74 (2013) 223–236
- [6] M.H. Mahfuz, M.R. Anisur, M.A. Kibria, R. Saidur, I.H.S.C. Metselaar, Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application 57 (2014) 132–139
- [7] Z. Hu, A. Li, R. Gao, H. Yin, Enhanced heat transfer for PCM melting in the frustum-shaped unit with multiple PCMs, *Journal of Thermal Anal Calorimetry* 120 (2015) 1407 – 1416
- [8] S. Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman, L. Rossetto, Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams, *International Journal of Thermal Sciences* 90 (2015) 79 – 89
- [9] P. Zhang, Z. Meng, H. Zhu, Y. Wang, S. Peng, Experimental and numerical study of heat transfer characteristics of a paraffin/metal foam composite PCM, *Energy Procedia* 75 (2015) 3091 – 3097
- [10] Y. Wang, L. Wang, N. Xie, X. Lin, H. Chen, Experimental study on the melting and solidification behaviour of erythritol in a vertical shell-and-tube latent heat thermal storage unit, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 99 (2015) 770 – 781.

[11] P. Felinski, R. Sekret, Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as a PCM 114 (2016).

[12] X. Kong, P. Jie, C. Yao, Y. Liu, Experimental study on thermal performance of phase change material passive and active combined using for building application in winter, *Applied Energy* 206 (2017) 293 – 302

[13] J. Lizana, R. Chacartegui, A. Barrios-Padura, J.M. Valverde, Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review, *Applied Energy* 203 (2017) 219 – 239

[14] Zakir Khan, Zulfiqar Ahmad Khan, Experimental investigations of charging/melting cycles of paraffin in a novel shell and tube with longitudinal fins based heat storage design solution for domestic and industrial applications, 206 (2017) 1158–1168

### **Estudios sobre diseño del intercambiador de PCM**

[15] Zhipei Hu , Angui Li, Ran Gao, Haiguo Yin Enhanced heat transfer for PCM melting in the frustum-shaped unit with multiple PCMs (2015) 120:1407–1416

[14] Z. Khan, Z.A. Khan, Experimental investigations of charging/melting cycles of paraffin in a novel shell and tube with longitudinal fins based heat storage design solution for domestic and industrial applications, *Applied Energy* 206 (2017) 1158 – 1168

[15] H. Niyas, C.R.C. Rao, P. Muthukumar, Performance investigation of a lab-scale latent heat storage prototype – Experimental results, *Solar Energy* 155 (2017) 971 – 984

[16] A. Pizzolato, A. Sharma, K. Maute, A. Sciacovelli, V. Verda, Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat transfer thermal energy storage through topology optimization, *Applied Energy* 208 (2017) 210 – 227

### **Reviews**

[17] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251 – 283

[18] M.M. Farid, A.M. Khudahir, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 1597 – 1615

[19] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 318 – 345

[20] A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D.R. Rousse, J.P. Cavrot, Rexperimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release, *Applied Energy* 88 (2011) 2454 – 2452

[21] H. Zhang, J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degrève, Y. Ly, Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects, *Progress in Energy and Combustion Science* 53 (2016) 1 – 40

[22] N.I. Ibrahim, F.A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B.S. Yilbas, A.Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017) 26 – 50

### **Libro**

[20] B. Kanimozhi, V. Pranesh, Thermal Energy Storage System using PCM for Solar Water Heating. Design, Experimentation, and Investigation of Heat Transfer Enhancement, Ed. LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-3-330-01074-1