



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

El alcance del presente trabajo abarca el diseño y construcción de una instalación experimental para poder medir las condiciones reales a la salida de condensadores en frigoríficos doméstico de alta eficiencia. Estos electrodomésticos, actualmente utilizan la unión de un tramo del tubo capilar (dispositivo de expansión) con la línea de succión al compresor para obtener subenfriamiento y sobrecalentamiento. La investigación surge al observar la existencia de flujo bifásico a la salida del condensador y entrada del dispositivo de expansión, lo que conlleva una reducción de la eficiencia del sistema. Para estudiar este fenómeno, se ha elaborado un banco de pruebas, en el cual se ha diseñado y efectuado un condensador de tubos gemelos, paralelo al original, que intercambie el calor con un circuito hidráulico auxiliar para poder estimar, mediante la medida de las condiciones del agua, las condiciones del refrigerante de manera más precisa.

Palabras clave: refrigeración, frigorífico de alta eficiencia, condensador, subenfriamiento, flujo bifásico.



RESUM

L'abast del present treball comprén el disseny i construcció d'una instal·lació experimental per a poder mesurar les condicions reals a l'eixida de condensadors en frigorífics domèstic d'alta eficiència. Aquests electrodomèstics, actualment utilitzen la unió d'un tram del tub capil·lar (dispositiu d'expansió) amb la línia de succió al compressor per a obtindre subrefredament i sobrecalfament. La investigació sorgix a l'observar l'existència de flux bifàsic a l'eixida del condensador i entrada del dispositiu d'expansió, la qual cosa comporta una reducció de l'eficiència del sistema. Per a estudiar este fenomen, s'ha elaborat un banc de proves, en el qual s'ha dissenyat i efectuat un condensador de tubs bessons, paral·lel a l'original, que intercanvie la calor amb un circuit hidràulic auxiliar per a poder estimar, per mitjà de la mesura de les condicions de l'aigua, les condicions del refrigerant de manera més precisa.

Paraules clau: refrigeració, frigorífic d'alta eficiència, condensador, subrefredament, flux bifàsic.





ABSTRACT

The present project's scope deals with the design and construction of an experimental facility in order to measure the real conditions at the condenser outlet of a high-efficiency household refrigerator. These household appliances currently use a junction of a section of capillary tube (expansion device) with the suction line to the compressor to obtain subcooling and superheating. The investigation arose due to the presence of two-phase flow at both condenser outlet and inlet of expansion device, which includes a reduction of the system efficiency. To study this phenomenon, a test bench has been designed, with a twin tubes condenser, parallel to the original one, which exchanges heat with a hydraulic auxiliary circuit in order to estimate accurately, through the measurement of water conditions, the actual conditions of the refrigerant at the inlet of the capillary tube.

Keywords: Refrigeration, high-efficiency refrigerator, condenser, subcooling, two phase flow.



DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- MEMORIA
- PRESUPUESTO

ÍNDICE DE MEMORIA

1. OBJETIVOS	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Introducción	4
3.2 Conceptos fundamentales	4
3.3. Elementos básicos	6
3.4. Ciclo del sistema frigorífico-congelador	10
3.5. Antecedentes del actual banco de ensayos	18
4. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN	25
4.1. Descripción general de la Instalación	25
4.2 Circuito refrigerante	27
4.3 Intercambiador refrigerante – agua	31
4.4 Circuito auxiliar de agua	34
4.5 Instrumentación	41
4.5.3 Transductor de presión	44
4.6 Sistema de adquisición de datos	45
4.7 Sistema de control	47
4.8 Elementos auxiliares	48
4.9 Representación 3D	49
5. CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	50
5.1. Introducción	50
5.2. Circuito refrigerante	50
5.3. Intercambiador Refrigerante-Agua	52
5.4. Circuito auxiliar agua	55
5.5. Instrumentación	56
6. CONDICIONES DE ENSAYO	61
6.1. Descripción de ensayos	61



6.2. Metodología de ensayo.....	62
7. CARACTERIZACIÓN DE UN PUNTO DE ENSAYO	64
8. ESTUDIO ECONÓMICO.....	65
9. CONCLUSIONES	66
10. REFERENCIAS	67

ÍNDICE PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	2
3. PRESUPUESTO BASE LICITACIÓN	5

DOCUMENTO N°1:

**MEMORIA
DESCRIPTIVA**

Diseño y montaje de una instalación experimental para el análisis de condensadores en frigoríficos de alta eficiencia.



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

ÍNDICE

1. OBJETIVOS	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Introducción	4
3.2 Conceptos fundamentales	4
3.2.1. <i>Primera y segunda ley de la termodinámica.</i>	4
3.3 Elementos básicos	6
3.4 Ciclo del sistema frigorífico-congelador	10
3.4.1. <i>Ciclo de Carnot</i>	10
3.4.2. <i>Ciclo real de una máquina de refrigeración.</i>	12
3.4.3. <i>Funcionamiento del sistema frigorífico-congelador.</i>	16
3.5 Antecedentes del actual banco de ensayos.	18
3.5.1. <i>Investigaciones precedentes</i>	18
3.5.2. <i>Banco experimental realizado en el IIE</i>	19
3.5.3. <i>Resultados y discusión tras la primera instalación experimental</i>	23
4. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN	25
4.1 Descripción general de la Instalación	25
4.2 Circuito refrigerante	27
4.2.1 <i>Descripción del circuito frigorífico</i>	27
4.2.2 <i>Componentes circuito refrigerante</i>	28
4.3 Intercambiador refrigerante – agua	31
4.4 Circuito auxiliar de agua	34
4.5 Instrumentación	41
4.5.1 <i>Transductores de temperatura.</i>	41
4.5.2 <i>Medidores de caudal másico</i>	43
4.5.3 <i>Transductor de presión</i>	44
4.6 Sistema de adquisición de datos	45
4.7 Sistema de control	47
4.7.1 <i>Cámara climática</i>	47
4.7.2 <i>Temperatura Interna Frigorífico-congelador</i>	48



4.8	Elementos auxiliares	48
4.9	Representación 3D	49
5.	CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	50
5.1.	Introducción	50
5.2.	Circuito refrigerante.....	50
5.3.	Intercambiador Refrigerante-Agua.....	52
5.4.	Circuito auxiliar agua.....	55
5.5.	Instrumentación	56
6.	CONDICIONES DE ENSAYO	61
6.1.	Descripción de ensayos.....	61
6.2.	Metodología de ensayo.....	62
7.	CARACTERIZACIÓN DE UN PUNTO DE ENSAYO	64
8.	ESTUDIO ECONÓMICO	65
9.	CONCLUSIONES	66
10.	REFERENCIAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cronograma de la tesis doctoral	3
Figura 3.1 Primera y segunda Ley de la Termodinámica.....	5
Figura 3.2 Máquina de refrigeración por absorción. [2]	5
Figura 3.3 Interior Compresor frigorífico	6
Figura 3.4 Intercambiador entre un tubo capilar y la línea de succión.....	7
Figura 3.5 Condensador doméstico para frigorífico-congelador	7
Figura 3.6 Tubo capilar real utilizado en refrigeración.	8
Figura 3.7 Esquema de funcionamiento de la Válvula termostática [3].	9
Figura 3.8 Esquema de funcionamiento evaporador [3]	9
Figura 3.9 Evaporador frigorífico doméstico.....	10
Figura 3.10 Ciclo Carnot inverso	11
Figura 3.11 Ciclo compresor real. [4]	14
Figura 3.12 Subenfriamiento y sobrecalentamiento en el ciclo frigorífico.	15
Figura 3.13 Tubo capilar como intercambiador extra.....	15
Figura 3.14 Ciclo real del frigorífico-congelador.	16
Figura 3.15 Funcionamiento frigorífico con sistema No Frost.	17
Figura 3.16 Tramo del condensador transparente.	19
Figura 3.17 Filtro transparente realizado en el primer banco de pruebas.	20
Figura 3.18 Posición de filtros y capilares.	20
Figura 3.19 Colocación de los tubos capilares en la línea de succión.	21
Figura 3.20 Esquema banco de ensayos inicial.	21
Figura 3.21 Primera instalación experimental.	22
Figura 3.22 Gráficas del perfil de temperatura del condensador a diferente carga.....	23
Figura 3.23 Zoom tramo condensador transparente.....	24
Figura 4.1 Esquema general instalación experimental.	26
Figura 4.2 Esquema circuito refrigerante.....	27
Figura 4.3 Compresor Embraco utilizado en la instalación experimental.	28
Figura 4.4 Compartimento del evaporador doméstico utilizado.....	29
Figura 4.5 Ventilador encargado de la distribución de aire.	30
Figura 4.6 Esquema Intercambiador mediante tubos gemelos.	31

Figura 4.7 Esquema tubos paralelos. [10]	32
Figura 4.8 Diferencia intercambio debido al sentido de flujo. [11]	32
Figura 4.9 Esquema diseño circuito auxiliar de agua.	34
Figura 4.10 Bomba de membrana simple.	35
Figura 4.11 Esquema de representación del Bypass a la bomba.	36
Figura 4.12 Representación esquemática bomba membrana.	36
Figura 4.13 Características del tanque de expansión utilizado. [12]	38
Figura 4.14 Aerotermo utilizado para el circuito de agua.....	39
Figura 4.15 Conducto aire forzado para Aerotermo.	40
Figura 4.16 Esquema funcionamiento Bypass.	40
Figura 4.17 Efecto Seebeck en termopares.	41
Figura 4.18 PT100 utilizada en la instalación experimental.....	42
Figura 4.19 Orientación preferente para líquido (izquierda) y gases (derecha).	43
Figura 4.20 Caudalímetro Emerson MicroMotion CMFS. [16]	44
Figura 4.21 Transductor Setra C280E.....	45
Figura 4.22 Transductor Emerson PT5-07M. [17]	45
Figura 4.23 Data logger de Agilent 34970A(izquierda) y captura de pantalla software BenchLink Data Logger 3 (derecha).	46
Figura 4.24 PIDs utilizados en la instalación experimental.	48
Figura 4.25 Representación 3D banco de pruebas.	49
Figura 5.1 Filtros y tubos capilares.....	50
Figura 5.2 Bypass para condensador Refrigerante-agua.	51
Figura 5.3 Colocación del caudalímetro del circuito de refrigerante.....	51
Figura 5.4 Plantilla para la construcción del condensador equivalente.	52
Figura 5.5 Proceso de soldadura del condensador equivalente.	54
Figura 5.6 Protección térmica y colocación en la instalación.	54
Figura 5.7 Base para la colocación del circuito auxiliar y frigorífico.	55
Figura 5.8 Montaje de manómetros, bomba y su bypass.	56
Figura 5.9 Tanque expansión, aerotermo y su bypass.....	56
Figura 5.10 Bloque isoterma para la corrección de los termopares.....	57
Figura 5.11 Dispositivos utilizados para la comprobación de los termopares de la instalación.....	58
Figura 5.12 Comprobación del termopar en el canal 101 del data logger.....	59

Figura 5.13 Colocación de los termopares utilizados en la instalación experimental.	59
Figura 5.14 Situación de la instrumentación de la instalación.....	60
Figura 5.15 Colocación del caudalímetro según indicación del fabricante.....	60
Figura 6.1 Balance de potencias caloríficas.....	61
Figura 6.2 Modo de funcionamiento estático.....	62

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1 Características del refrigerante R-600a	30
Tabla 4.2 Características del condensador equivalente.....	33
Tabla 4.3 Características del Aerotermo utilizado.	39
Tabla 4.4 Características de los caudalímetros utilizados en la instalación.....	44
Tabla 4.5 Situación de los dispositivos en las tarjetas del data logger	47
Tabla 5.1 Características material de aporte	53
Tabla 6.1 Condiciones estacionarias en ensayos	62

1. OBJETIVOS

Este Trabajo Final de Grado (TFG), tiene como objetivo principal el diseño y construcción de una instalación experimental que mediante un circuito hidráulico intercambie el mismo calor al que transferiría el condensador original de un frigorífico doméstico con el ambiente. La creación del banco de ensayo tiene el fin de poder medir las condiciones reales del refrigerante a la salida del condensador de un frigorífico doméstico de alta eficiencia, debido a que el intercambio con el ambiente es por convención natural, su medición resulta inexacta y aleatoria.

Este TFG está englobado en un proyecto de mayor envergadura del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería Energética (IIE) en el que se está llevando a cabo la tesis doctoral de Laetitia Bardoulet dirigida por Dr. Santiago Martínez Ballester y Dr. José Miguel Corberán. Esta tesis tiene como objetivo el análisis de condensadores en frigoríficos de alta eficiencia. En el presente apartado se detalla exclusivamente la finalidad de este TFG

La primera etapa del actual trabajo final de grado, ha consistido en el diseño y selección de los diferentes elementos necesarios para dos circuitos. El primer circuito es el recorrido original de refrigerante, el cual se ha tenido que rediseñar debido a la necesidad de hacer pasar al flujo por un nuevo intercambiador. Para la medida exacta de calor extraído del refrigerante, se ha diseñado un segundo circuito auxiliar, utilizando agua como fluido de intercambio. Este circuito, va a permitir conocer los resultados de manera más precisa.

Una vez realizado el diseño de la instalación, se ha procedido a su construcción. Se ha colaborado en las modificaciones necesarias de la instalación experimental utilizada en la primera etapa del proyecto, en la creación del circuito auxiliar de agua y en el intercambiador equivalente con agua.

En una segunda etapa, se ha llevado a cabo la comprobación de la instrumentación como, por ejemplo, los distintos sensores de temperatura o presión.

Tras finalizar este capítulo, se ha detallado el conjunto de ensayos que se han de realizar durante la campaña experimental. El capítulo 6 de la presente memoria, explica las diferentes pruebas que se han planeado llevar a cabo.

Por último, se ha desarrollado la caracterización de uno de los puntos de ensayo mencionado anteriormente, donde se explica el procedimiento a seguir para obtener la carga óptima de refrigerante con el condensador de aire en condiciones estáticas.

2. JUSTIFICACIÓN

El panorama energético en la sociedad actual, tiene gran relevancia al estar altamente controlado gracias a toda la información a la que se tiene acceso. Así, la sociedad ha reclamado cambios en los diferentes elementos utilizados de manera cotidiana, tanto a nivel medioambiental como económico. Esto ha influido, entre otras soluciones, en la mejora de la eficiencia energética.

El presente trabajo corresponde al campo de los electrodomésticos, concretamente a un sistema frigorífico-congelador doméstico. Los frigoríficos son los que conllevan el mayor consumo energético en los hogares, ya que se puede decir que son elementos que de manera continua están consumiendo energía para realizar su función. Este suceso ha llevado a la realización de numerosas investigaciones y con ello grandes avances tecnológicos para maximizar el ahorro económico.

Para conseguir el control adecuado, en materia de eficiencia energética e impacto ambiental de los electrodomésticos, la Unión Europea ha obligado a desarrollar una clasificación mediante una etiqueta energética. Esta etiqueta ha tenido gran relevancia para los consumidores al proporcionarle una visión orientativa de las prestaciones de cada electrodoméstico y así facilitar la elección. La clasificación de la etiqueta va desde G, siendo la de menor eficiencia, hasta la A con el menor consumo. En el caso de la categoría A, se han creado subgrupos: A⁺, A⁺⁺, A⁺⁺⁺, que van mejorando cada vez más sus prestaciones.

Como se ha comentado, el tema energético cada día tiene mayor importancia en el escenario actual. Por ello, la Universitat Politècnica de Valencia creó el 10 de abril de 2001 el Instituto de Ingeniería Energética con dos objetivos:

- Tratar los distintos temas de I+D+i que abarcan el campo de la energía.
- Llevar a cabo estudios de evaluación y prospección sobre ese campo.

Siguiendo los objetivos establecidos, el Instituto se divide en seis zonas de actuación: eléctrica, térmica, nuclear, prospectiva y evaluación, energías renovables y por último en aplicaciones no energéticas. Las actividades realizadas tienen relación con centros de investigación y empresas tanto a nivel nacional como internacional.

Como se ha mencionado el Instituto tiene implicación en materia de energía térmica. Por lo que se ha propuesto estudiar el dispositivo de expansión en frigoríficos, al comprobar que ensayos externos al instituto relacionados con la existencia de flujo bifásico a la entrada del tubo capilar no eran concisos. Todo el estudio se ha realizado en un frigorífico-congelador de categoría A⁺⁺⁺. Inicialmente se crea un primer banco de pruebas, durante el año 2014 y hasta septiembre de 2015, a través de una línea de investigación del IIE. La tesis doctoral comienza en septiembre de 2015 realizando sobre el primer banco de pruebas ensayos de la campaña experimental. El inicio del presente trabajo no ha coincidido con el comienzo de la tesis, por lo que se ha partido desde una situación concreta. A continuación, se muestra un cronograma donde se detalla las actividades a realizar antes, durante y posteriormente al actual Trabajo Final de Grado (TFG). Se ha recuadrado en rojo el periodo en el que ha sido realizado este TFG.

Planificación temporal

- 1) Desarrollo del primer banco de pruebas y su puesta a punto.
- 2) Realización de ensayos observando la existencia de flujo bifásico a la entrada del tubo capilar.
- 3) Análisis de los resultados.
- 4) Desarrollo del segundo banco de pruebas.
 - a) Planificación y diseño.
 - b) Montaje de los distintos circuitos.
 - c) Calibración de la instrumentación.
- 5) Puesta en marcha de la instalación experimental para la medición del título de vapor a la entrada del tubo capilar.
 - Regulación de los PIDs.
 - Ajuste del caudal mediante válvula reguladora.
- 6) Campaña experimental de medición.
 - a) Ensayo con el condensador con aire para obtener la carga óptima del circuito refrigerante.
 - b) Ensayo con el condensador con agua para encontrar la carga que iguale las condiciones de carga óptima del condensador con aire.
 - c) Análisis de la entrada del capilar cambiando la temperatura de condensación variando el caudal de agua.
- 7) Análisis de resultados.

Objetivos	ene-14	feb-14	mar-14	abr-14	may-14	jun-14	jul-14	sep-14	oct-14	nov-14	dic-14
1											
Objetivos	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15
2											
3											
Objetivos	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16
4.a											
4.b											
4.c											
5											
6.a											
Objetivos	ene-17	feb-17	mar-17	abr-17	may-17	jun-17	jul-17	sep-17	oct-17	nov-17	dic-17
6.a											
6.b											
6.c											
Objetivos	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18	sep-18	oct-18	nov-18	dic-18
7											

Figura 2.1 Cronograma de la tesis doctoral

3. ANTECEDENTES

3.1 Introducción

Siendo el caso del presente trabajo final de grado (TFG) una máquina frigorífica doméstica (frigorífico-congelador) mediante compresión de vapor, utilizada para la conservación de alimentos perecederos, es imprescindible entender que se precisa una transformación de energía para lograr su objetivo.

Para entender los procesos que sufre la máquina frigorífica al realizar un ciclo, se exponen explicaciones de termodinámica fundamentales referente a todas ellas, donde se explican las leyes que rigen las distintas etapas. Y más específicamente, al ser el caso de estudio el frigorífico-congelador con su sistema particular de compresión, se realiza una explicación física de las máquinas por compresión de vapor, donde se detallan y definen los distintos elementos esenciales que llevan a cabo los ciclos que permiten conseguir el propósito establecido, reducir la temperatura de un espacio concreto.

3.2 Conceptos fundamentales

Para entender el ciclo que se realiza de manera continua en un circuito de refrigeración como es el tema a tratar, hay que entender como dice el título de este apartado, unos conceptos elementales.

Para el estudio del ciclo, se utiliza la llamada campana de saturación, que delimita las zonas en estado líquido, líquido-vapor o vapor, que es particular a cada fluido.

3.2.1. Primera y segunda ley de la termodinámica.

Partiendo de la definición de la primera ley de la termodinámica que expone que la energía ni se crea ni se destruye, si no que se conserva. La energía que se intercambia, se transforma en otro tipo de energía equivalente.

El objetivo de una máquina de refrigeración es conseguir transmitir el calor desde la fuente, que en este caso es el aire interior del frigorífico, hasta el aire que está en el ambiente del habitáculo donde esté situado. Para llevar a cabo este proceso, siempre debe realizarse bajo las condiciones de la segunda ley de la termodinámica, que expone que todo cuerpo en contacto o no con otro, al existir un gradiente de temperatura, de manera natural y espontánea va a transmitir el calor siempre del cuerpo más cálido al más frío hasta intentar conseguir igualar la temperatura de ambos cuerpos.

Esta ley demuestra que es imposible lograr transferir de manera espontánea el calor del cuerpo más frío al cuerpo más cálido. La única manera de conseguir este resultado es con la aplicación de un trabajo, como expone la segunda ley de la termodinámica. Siguiendo ambas leyes de la

termodinámica, podemos decir que el calor cedido al ambiente de la habitación (Q_2) es la suma del calor extraído del interior del frigorífico (Q_1) más el trabajo aportado (W). El resultado se puede observar en la Figura 3.1

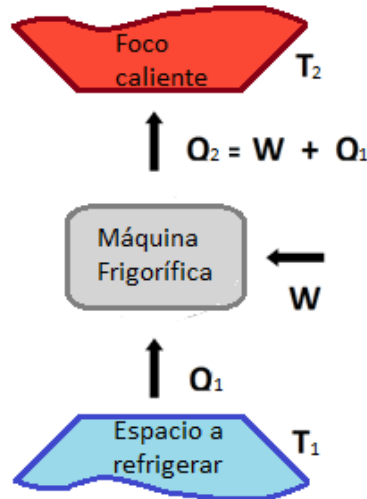


Figura 3.1 Primera y segunda Ley de la Termodinámica

El trabajo necesario para llevar a cabo el ciclo puede ser de distintos fenómenos, aunque lo más habitual es que se realice con trabajo mecánico. Como se ha dicho, también es posible obtener el trabajo requerido a partir de otras técnicas, por ejemplo, a partir de procesos térmicos como son las máquinas por absorción donde se puede utilizar, por ejemplo, la energía solar como fuente que aporta el trabajo, aunque es un método utilizado normalmente para bajas potencias al requerir de una notable cantidad de espacio, como podemos observar en la Figura 3.2. El procedimiento para lograr la refrigeración de espacios, más habitual y también el utilizado en este trabajo final de grado, son las máquinas de compresión de vapor.



Figura 3.2 Máquina de refrigeración por absorción. [2]

La generación de frío mediante compresión de vapor se basa en hacer pasar por un medio mecánico, a través de un compresor, un refrigerante para obtener dos zonas claramente diferenciadas en cuanto a presión se refiere. La diferencia de presión que se establece permite conseguir el principal objetivo que es extraer el calor de un espacio para transferirlo a otro.

3.3. Elementos básicos

Como se ha mencionado, la forma más habitual de producir frío es mediante la máquina por compresión de vapor. Por lo que se va a explicar el funcionamiento de los distintos elementos principales que normalmente llevan a cabo las distintas etapas del proceso de refrigeración.

Compresor

Es el elemento que aporta el trabajo necesario para conseguir el aumento de presión. El compresor, a partir de un motor eléctrico, varía el volumen del vapor, incrementando así su densidad y con ello la presión. Como es el único elemento que consume una energía que conlleva costes económicos asociados, se debe evitar en la manera de lo posible que esté funcionando.

Debido al compresor, en el circuito se generan dos zonas diferenciadas por un incremento de presión, la zona de alta presión (salida del compresor) y la zona de baja presión (entrada del compresor).

Hoy en día el compresor puede tener un variador de frecuencia que permite, mediante electrónica, regular el caudal que circula por la instalación y mejorar . Al ser capaces de regular el caudal, se puede funcionar en distintas condiciones de trabajo. La utilización del variador de frecuencia a favorecido a la eficiencia de las máquinas frigoríficas, ya que antes de ser capaces de modificar la potencia que aportaba el compresor, se diseñaba para unas condiciones de trabajo habituales, pero cuando estas condiciones eran modificadas, el compresor seguía funcionando para unas condiciones que ya no eran las reales en ese momento, reduciendo así la eficiencia de la máquina frigorífica.

El compresor es un elemento que por seguridad y para evitar que sufra daños está cerrado herméticamente por una carcasa. En su interior se encuentra un motor eléctrico que permite llevar a cabo la compresión como se puede ver en la Figura 3.3.

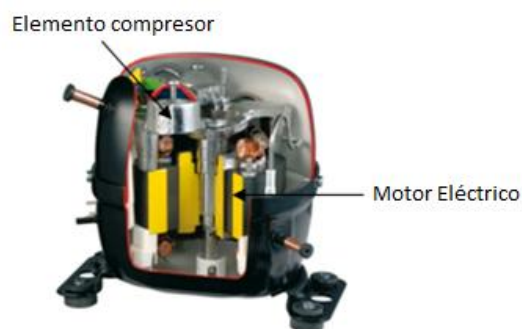


Figura 3.3 Interior Compresor frigorífico

En la línea de succión al compresor puede existir riesgo de que todo el refrigerante no se encuentre en estado de vapor, por lo que debe existir un incremento de calor para evitar que un posible porcentaje del refrigerante entre en estado líquido, ya que podría provocar el fallo del compresor. Esto actualmente, se consigue enlazando una sección del tubo capilar, dispositivo de expansión, a la entrada del compresor como se puede ver en la Figura 3.4.

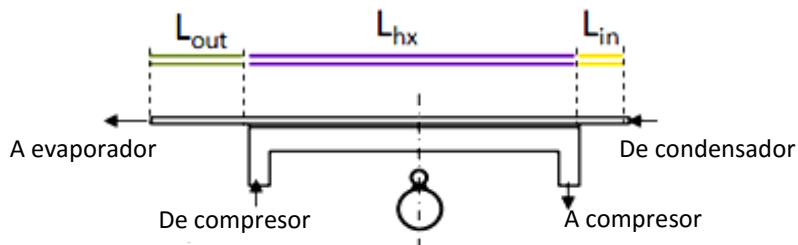


Figura 3.4 Intercambiador entre un tubo capilar y la línea de succión.

Condensador

Es el elemento que se encarga de evacuar el calor que se encuentra en el flujo. El condensador está formado por un serpentín que proporciona una superficie para la transferencia del calor. Este calor habitualmente en los refrigeradores domésticos es intercambiado con el aire ambiente.

La función del condensador es la de actuar como un intercambiador de calor con otro fluido caloportador. Siendo así, mientras el flujo atraviesa el condensador, el fluido mantiene su temperatura constante cediendo el calor latente, calor necesario para poder llevar a cabo una transformación de estado. Así el fluido pasa de estado de vapor a estado líquido.

Como prima reducir el espacio, los condensadores se sitúan en la parte trasera de los frigoríficos ocupando casi su totalidad. Esta forma de colocación conlleva un aumento de unos pocos centímetros de profundidad del frigorífico. Además, para conseguir una mayor transferencia de calor se utilizan alambres transversales a los tubos en función de aletas, proporcionando mayor área de contacto con el ambiente. Todo esto se puede observar en la siguiente Figura 3.5.



Figura 3.5 Condensador doméstico para frigorífico-congelador

Los condensadores utilizados en los frigoríficos están contruidos en acero negro, llamado así debido a que en su fabricación se crea una capa de óxido de hierro que le proporciona ese color. En otras aplicaciones, se utiliza aluminio, acero inoxidable o cobre, estos materiales también proporcionan buenas características aunque tiene un coste económico más elevado.

Dispositivo de expansión

El funcionamiento de estos elementos consiste en reducir la presión del flujo basándose en la aplicación de una notable cantidad de pérdidas de carga. Esto le genera al fluido una reducción de gran parte de su presión y también como consecuencia una disminución su temperatura.

Inicialmente, se podría pensar en utilizar como dispositivo de expansión un elemento que nos proporcionase trabajo al reducir la presión como podría ser una turbina. Pero en la práctica no se lleva a cabo debido a su complicado mantenimiento y a la dificultad que supone su aprovechamiento energético.

Existen distintas alternativas para realizar el proceso de expansión mediante sencillos elementos que resultan más útiles. El principal dispositivo utilizado son los tubos capilares debido a su escasa complejidad, ya que son unos simples tubos muy finos del orden de milímetros de diámetro como se puede apreciar en la Figura 3.6. Es un dispositivo que normalmente se fabrica en cobre gracias a su excelente maleabilidad y ductilidad que permite transformar al metal en forma de tubo muy fino y en forma de serpentín.

Aunque son buenos por su simplicidad, presentan inconvenientes debido a que no permite el control másico ni la gestión del sistema.



Figura 3.6 Tubo capilar real utilizado en refrigeración.

Además del escaso control que tienen los tubos capilares, uno de los inconvenientes que conlleva su utilización es el ruido que se genera debido a la re-condensación interna del tubo capilar. Esta re-condensación puede provocar una reducción de la eficiencia si se utiliza como intercambiador entre el tubo capilar y la entrada del compresor.

Dentro de los dispositivos que permiten la expansión del fluido, tenemos también las válvulas de expansión termostáticas (VET). Estas válvulas si permiten el control y gestión del sistema, pero actualmente los fabricantes no las producen para potencias tan reducidas como pueden ser la de los equipos frigoríficos, ya que suelen tener una potencia frigorífica en torno a 100W. Su aplicación suele ser para potencias mayores que a la que trabaja habitualmente un frigorífico doméstico.

Para conseguir el control del caudal utilizan un bulbo sensor que a partir de la temperatura que mide, abre o cierra una válvula interna controlando así el caudal que pasa a través del dispositivo como se puede ver en la siguiente Figura 3.7.

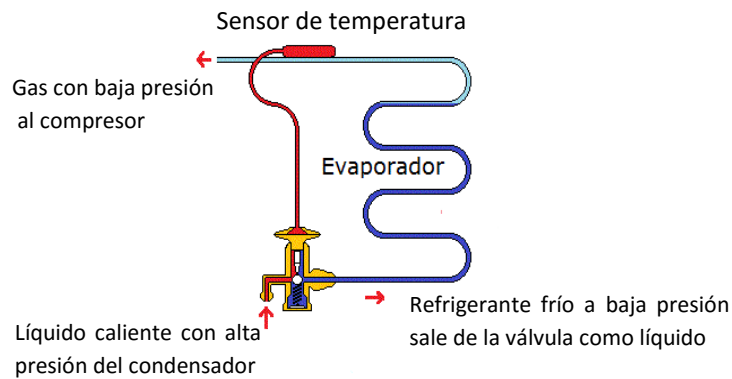


Figura 3.7 Esquema de funcionamiento de la Válvula termostática [3].

Evaporador

Por último, otro de los dispositivos principales de una máquina de refrigeración es el evaporador. Es el elemento realmente encargado de enfriar la zona que queremos refrigerar, ya que es quien absorbe el calor de ese espacio consiguiendo así reducir su temperatura.

El flujo de refrigerante, igual que ocurre cuando atraviesa el condensador, al atravesar el evaporador va incrementando su calor latente, pero no su temperatura hasta prácticamente el final del mismo. El calor que absorbe el fluido es utilizado para conseguir el cambio de estado, llevando al fluido a estado gaseoso. Todo ello queda expuesto en la Figura 3.8, donde se puede ver el funcionamiento esperado del evaporador situado en el congelador.

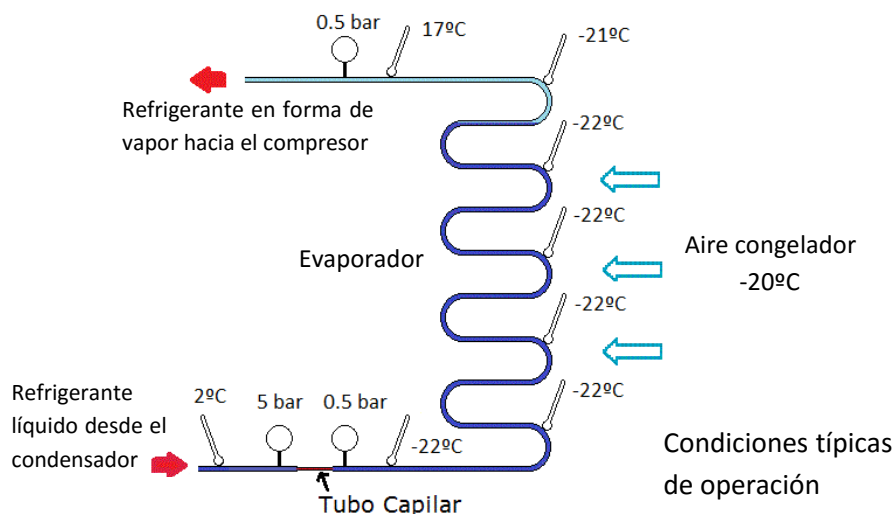


Figura 3.8 Esquema de funcionamiento evaporador [3]

El evaporador esta formador, como se puede apreciar en la Figura 3.9, por una tubería curvada donde se le ha añadido una fina superficie de aluminio llamada aletas, que permite intercambiar de manera más eficaz el calor.



Figura 3.9 Evaporador frigorífico doméstico

3.4. Ciclo del sistema frigorífico-congelador

Para una correcta explicación del ciclo que se realiza en todo elemento de refrigeración, primero se tiene que entender cuál es el ciclo que aportaría el mejor rendimiento. Este ciclo ideal es el llamado ciclo de Carnot. Tras el ciclo ideal se va a exponer las condiciones reales de funcionamiento, describiendo así el ciclo que realmente se lleva a la práctica.

3.4.1. Ciclo de Carnot

El ciclo ideal que se expone a continuación, es el ciclo de sentido inverso de Carnot al tratarse de refrigeración y no de producción de calor.

Siguiendo los tramos que se realizarían mediante este ciclo, habría dos transformaciones adiabáticas (no existe pérdida de calor) y dos isotérmicas (la transformación transcurre a temperatura constante):

Fase 1-2: Considerando que el ciclo comienza a la entrada del compresor, lo primero que ocurrirá será una compresión isoentrópica (siendo un proceso adiabático y reversible), pasando de la temperatura inferior (T_1) hasta la temperatura superior (T_2). Este proceso se realiza al aplicar un trabajo (W). Al finalizar esta etapa, el fluido está en estado de vapor saturado.

Realizar este proceso en estado líquido-vapor al encontrarnos dentro de la campana de saturación sería muy perjudicial para el compresor, el cual necesita trabajar solo con vapor.

Fase 2-3: Tras salir del compresor llegamos al condensador, donde se consigue alcanzar la temperatura ambiente en el fluido (T_s), cediendo el calor de forma irreversible (Q_2). Siendo una transformación a temperatura y presión constante. Al finalizar esta etapa, el fluido está en estado de líquido saturado.

Fase 3-4: Como establecen las leyes de la termodinámica, el fluido después de haber obtenido una compresión, debe sufrir una expansión. Este proceso permite reducir la temperatura llegando de nuevo a T_1 . La transformación sucede sin intercambio de calor mediante una expansión isoentrópica. Al estar dentro de la campana de saturación, el flujo es bifásico por lo que existe un porcentaje tanto de vapor como de líquido.

Fase 4-1: Por último, para cerrar el ciclo se lleva a cabo la vaporización del líquido en el evaporador, aunque no todo queda vaporizado al no salir de la campana de saturación. Este proceso se realiza a temperatura y presión constante. Se consigue alcanzar la temperatura del fluido en la zona que queremos refrigerar (T_s). Esta transformación es la que permite enfriar el espacio que queremos refrigerar al extraer el calor (Q_1).

Todas estas transformaciones ocurridas en el ciclo de Carnot inverso se muestran en el siguiente diagrama T-s, Figura 3.10.

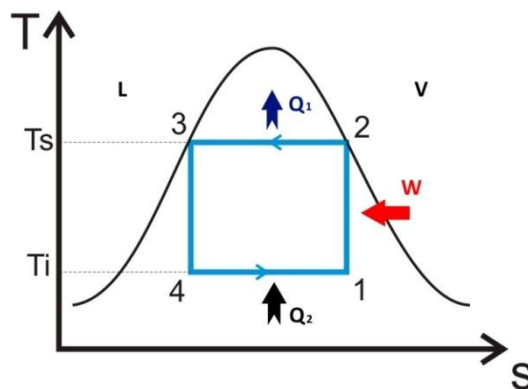


Figura 3.10 Ciclo Carnot inverso

El ciclo anteriormente descrito, es llamado ideal debido a que no tiene en cuenta factores que ocurren siempre en mayor o menor medida en la práctica. Gracias a esta condición se consigue tener el mayor rendimiento posible, es tan alto que incluso llega a superar el valor de la unidad, hecho que es contrario a la propia definición de rendimiento, ya que el rendimiento es el cociente entre la cantidad de calor que podemos extraer y el trabajo que aportamos para ello, lo que incumple las leyes de la termodinámica.

Este ciclo es útil, si en lugar de rendimiento utilizamos el término llamado eficiencia o coeficiente de operación, COP (del inglés *Coefficiente Of Performance*), que sí puede ser mayor que la unidad. Este término permite conocer el límite teórico máximo que se podría alcanzar con una máquina al trabajar entre dos temperaturas.

Existen distintos caminos para llegar a la explicación de la eficiencia en función únicamente de la temperatura. En este texto, para poder llegar a esa conclusión se van a llevar a cabo unas ecuaciones relacionadas con la entropía (s).

El calor absorbido del espacio que queremos refrigerar es igual a:

$$Q_1 = T_1 \cdot (s_1 - s_4) \quad (3.1)$$

El calor cedido por el condensador al ambiente es:

$$Q_2 = T_2 \cdot (s_2 - s_3) \quad (3.2)$$

A partir de la definición de la Primera Ley de la Termodinámica:

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (3.3)$$

Resultando el valor de la eficiencia aplicada a la máquina de refrigeración ideal igual a:

$$COP_c = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (3.4)$$

Por tanto, para mejorar la eficiencia de la máquina frigorífica, es necesario tener una temperatura del espacio que queremos enfriar lo más elevada posible, es decir, que no se requieran temperaturas muy bajas en el espacio que se pretende refrigerar y un gradiente de temperatura reducido entre ambos focos. Este hecho da a conocer resultados como que en épocas donde las temperaturas del ambiente (T_2) son más elevadas, hacen disminuir la eficiencia de la máquina de refrigeración.

3.4.2. Ciclo real de una máquina de refrigeración.

Tras comprobar que el ciclo ideal no se puede llevar a cabo, se debe explicar cuáles son los factores que difieren al ciclo del que realmente se puede conseguir.

Existe una primera aproximación al ciclo real, es el llamado ciclo de una máquina de compresión perfecta, donde se sigue considerando una compresión isoentrópica y manteniendo los intercambiadores ideales (reversibles). El único elemento que está más próximo a la realidad es el dispositivo de expansión al considerarse como irreversible. Para no extender demasiado la explicación, se van a detallar todos los cambios que se llevan a cabo en el ciclo real y posteriormente debido a su complejidad, se expondrá un resultado simplificado, donde no se considera las pérdidas que se generan en las válvulas de entrada y salida de fluido en el compresor.

Los procesos reales del ciclo difieren del ciclo perfecto en:

- **Pérdidas de carga**

Idealmente se supone que el refrigerante no sufre pérdida de carga al trasegar los distintos elementos del ciclo, sin embargo, todos los elementos generan un mínimo de pérdidas de carga. Estas pérdidas tienen como resultado una reducción de la presión. La reducción de presión genera un aumento del gasto energético que conlleva el compresor. Estas pérdidas dependerán de:

1. Propiedades del refrigerante.
2. Intercambiadores.
3. Tuberías.

Las pérdidas de carga son la caída de presión que se produce en cualquier circuito por donde pasa un fluido, debido a la fricción que ejerce el fluido al entrar en contacto con las paredes de las tuberías que conducen al fluido. Esta fricción generada, provoca una pérdida de energía.

Las pérdidas totales son debidas al contacto continuo con las rugosidades que existen en las tuberías más las pérdidas localizadas que se producen en posibles cambios de sección como estrechamientos, codos o al encontrarse con elementos como válvulas.

- **Intercambiadores**

A la hora de definir los intercambiadores, se hace referencia tanto al condensador como al evaporador al estimar que ambos son semejantes para estas consideraciones.

En los procesos de intercambio ideal, se supone proceso reversible y adiabático, pero realmente se va a llevar a cabo como etapa irreversible, ya que las superficies no son infinitas. Esto conlleva un gradiente de temperatura finito entre los flujos, como consecuencia se va a tener siempre una temperatura mayor en el condensador que en el ambiente y también una temperatura mayor en la zona que se quiere refrigerar que en el evaporador. Esto genera una mayor relación de compresión que en el caso ideal.

- **Compresor**

El compresor es el elemento que más difiere del ideal, ya que no se tienen en cuenta varias consideraciones.

La principal diferencia del compresor real alternativo, se debe a la existencia de un volumen perjudicial (V_p) o volumen "muerto". Se define como volumen muerto ya que es el volumen que se comprime, pero no llega a salir del compresor por lo que se expande y vuelve a ser comprimido. Esto es debido a la necesidad de tener que dejar un espacio mínimo para la apertura de las válvulas. Se puede observar en la siguiente Figura 3.11.

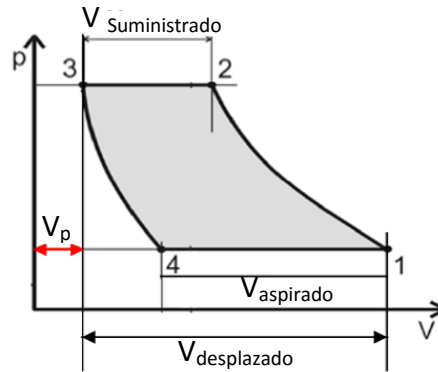


Figura 3.11 Ciclo compresor real. [4]

Además del volumen perjudicial, hay que tener en cuenta otros factores como son las fugas, ya que a mayor diferencia de presión entre la entrada y la salida (relación de compresión) mayor es la posibilidad de que existan pérdidas de presión y las pérdidas de carga al tener que pasar un flujo a través de un pequeño orificio (válvulas) genera una disminución de presión.

También, al tratarse de un fluido en estado de vapor, que al comprimirse se calienta acaba calentando al compresor. Cuando el vapor entra, el espacio está caliente lo que provoca un aumento del volumen específico del vapor y esto reduce el gasto másico ($\frac{M}{T}$) que puede circular.

El compresor al ser el único elemento que tiene un consumo energético y al ser un componente utilizado para muchas aplicaciones, es uno de los dispositivos que más han sido investigados respecto a los otros componentes del ciclo. Por lo que, actualmente se conoce de manera precisa su funcionamiento y se han logrado grandes avances sobre él.

- **Recalentamiento y subenfriamiento**

Por último, hay que tener en cuenta dos factores importantes a la hora de realizar el ciclo como son el recalentamiento y el subenfriamiento.

En el ciclo de compresión perfecta, se considera que la salida del condensador y la línea de succión del compresor trabajan en estado saturado, pero esto no tiene por qué ser así.

Subenfriamiento de líquido. Se refiere a la capacidad de conseguir que el fluido que atraviesa el condensador no solo se quede en estado de líquido saturado, sino que además salga de la campana de saturación y se convierta en líquido subenfriado gracias a una refrigeración adicional. Este enfriamiento extra puede ocurrir en el mismo condensador o en un elemento específico para ello. Tiene un máximo teórico, que nunca se podrá alcanzar, en la temperatura del fluido ambiente.

La existencia de líquido subenfriado aumenta la capacidad de absorción de calor en el evaporador, como se puede observar en la Figura 3.12, lo que conlleva un aumento de la eficiencia del sistema frigorífico.

Recalentamiento de vapor. Hace referencia a la capacidad de conseguir que el fluido que está en la línea de succión del compresor y que sale del evaporador como vapor saturado, permita

incrementar su calor consiguiendo así que sea vapor seco, es decir, que no tenga nada de líquido como se puede observar en la Figura 3.12. Esto es necesario ya que la existencia de líquido a la entrada del compresor puede provocar su fallo. Aunque es necesario realizar este proceso como se ha explicado en el anterior punto, un aumento de temperatura del vapor aumenta el volumen específico y por tanto disminuye el caudal circulante, resultando ser inconveniente. Este proceso puede llevarse a cabo a partir del mismo evaporador con los llamados evaporadores secos, que consiguen transformar todo el líquido o mediante la utilización del tubo capilar (dispositivo de expansión) como intercambiador adicional.

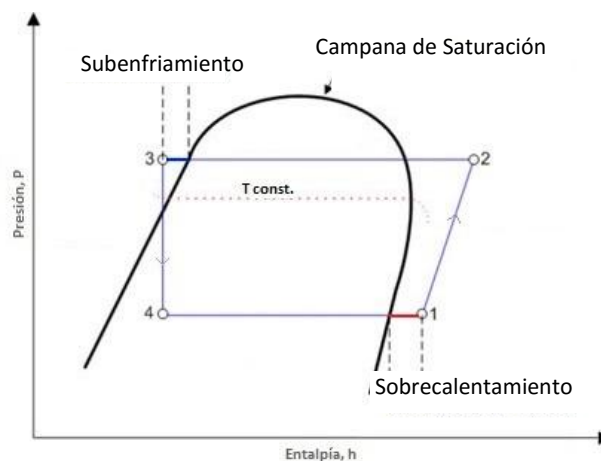


Figura 3.12 Subenfriamiento y sobrecalentamiento en el ciclo frigorífico.

Como se ha mencionado, el proceso de subenfriamiento y sobrecalentamiento, se llevan a cabo simultáneamente, y pueden tener el mismo valor si utilizamos el tubo capilar como intercambiador en la entrada al compresor como se puede ver en la Figura 3.13.

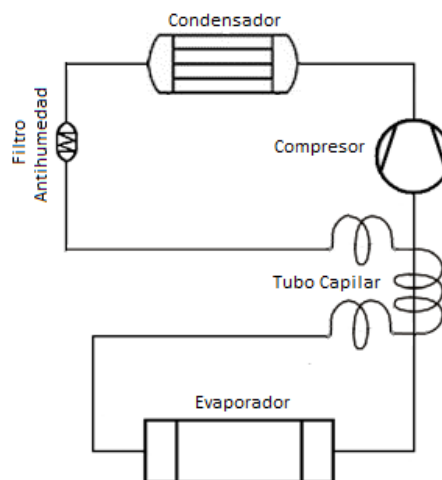


Figura 3.13 Tubo capilar como intercambiador extra.

Tras explicar todos los procesos que difieren del ciclo ideal y de compresión perfecta. El ciclo real resultante suponiendo que el dispositivo de expansión permite conseguir subenfriamiento y sobrecalentamiento, queda como la siguiente Figura 3.14.

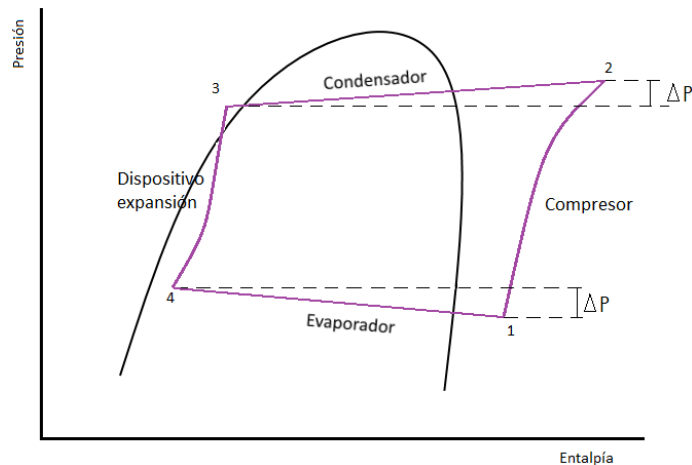


Figura 3.14 Ciclo real del frigorífico-congelador.

3.4.3. Funcionamiento del sistema frigorífico-congelador

El funcionamiento se basa en enviar aire a baja temperatura a ambos compartimentos, frigorífico y congelador, consiguiendo así refrigerar el espacio deseado. Para que el aire pueda llegar a ambos espacios, se precisa de un ventilador que lo distribuya.

Para llevar a cabo la explicación se detalla el funcionamiento en cada compartimento, además de un esquema del movimiento que lleva el aire al refrigerar en la Figura 3.15.

Espacio congelador. Inicialmente, el aire que está en contacto con el evaporador y, por tanto, el de menor temperatura, se lleva al compartimento del congelador (7). Para poder controlar y distribuir el caudal de aire, se utiliza un ventilador interno que, según la electrónica, impulsará más o menos flujo para alcanzar la temperatura deseada. Cuando se alcance la temperatura de consigna, la compuerta del distribuidor (7) se cerrará.

Espacio frigorífico. Como el compartimento frigorífico, siempre va a necesitar una temperatura mayor que la que hay en la sección del congelador. Para conseguir refrigerar el compartimento frigorífico, se utiliza el aire que está a baja temperatura en el congelador, pero no lo suficiente para él.

El aire en el interior del congelador, llega hasta la compuerta de la parte frigorífica, esta compuerta se llama dámper y es la que mediante electrónica permite el paso del flujo de aire al frigorífico (5), donde se deja pasar un caudal de aire en función de la temperatura que haya en el compartimento. Tras atravesar la compuerta el aire se distribuye mediante un sistema Multiflow (6) para conseguir mantener la temperatura que se requiere y de manera uniforme. A la vez, mientras va entrando un caudal de aire frío, se está extrayendo un flujo de aire más caliente a

través de unas ranuras (4) que lo llevan de vuelta al evaporador. Mediante electrónica se regulan los caudales que entran y salen e incluso cuando se alcanza la temperatura deseada, se cierran las compuertas.

Este modo de funcionamiento es el que se está llevando a cabo en los frigoríficos actuales, y es el sistema llamado No Frost. En los frigoríficos convencionales, existían dos partes de evaporador, una se encontraba en el compartimento frigorífico y se encargaba de extraer el calor únicamente de ese espacio, el otro tramo se encontraba en el congelador y realizaba su función para este compartimento. Debido a la existencia de humedad en los compartimentos, tanto del ambiente al abrir las compuertas, o de los propios alimentos. Al reducirse la temperatura esa humedad se convertía en hielo en las placas del evaporador, esto disminuía la eficiencia de la máquina. La llegada del sistema No Frost, consistió en situar el evaporador únicamente en la zona del congelador y mediante un ventilador y distintas puertas (Damper) dirigidas mediante electrónica, se distribuye el frío a ambos compartimentos, al no haber en la zona de frigorífico una placa suficientemente fría, no se genera hielo. Para la zona de congelador donde se encuentra el evaporador, se ha situado una resistencia que hace que el hielo que se forme, pueda ser eliminado sin la necesidad de parar y descongelar el frigorífico.

El inconveniente que genera este sistema es que, en la zona de frigorífico, cuando el compartimento se encuentra suficiente tiempo cerrado, el evaporador elimina la humedad del aire y provoca que los alimentos se sequen de manera más rápida.



Figura 3.15 Funcionamiento frigorífico con sistema No Frost.

3.5. Antecedentes del actual banco de ensayos.

Como se ha mencionado, el presente Trabajo Final de Grado surge de la tesis doctoral que se está llevando a cabo en el Instituto de Ingeniería Energética por Laetitia Bardoulet.

El primer banco de pruebas se ha realizado debido a la necesidad de comprobar exhaustivamente el correcto funcionamiento de la parte de expansión del ciclo frigorífico.

Los frigoríficos actuales, se encuentran en la búsqueda de la reducción de consumo energético, ya que el mercado es competitivo y los usuarios finales quieren reducir el gasto que les conlleva mantener los alimentos refrigerados. Las grandes empresas que se dedican al diseño y a la construcción de frigoríficos domésticos, han desarrollado distintas mejoras que han conseguido aumentar de manera notable la eficiencia sobre estas máquinas frigoríficas. Ejemplos de esto son: la utilización de electrónica para conseguir un mejor control, compresores de velocidad variable que reducen el consumo energético o la utilización de un tubo capilar para realizar dos funciones; como elemento de expansión y como intercambiador intermedio con la línea de succión para conseguir subenfriamiento y sobrecalentamiento.

En cuanto a este último ejemplo, es un sistema de gran simplicidad y reducido coste, aunque su utilización conlleva algunos problemas.

El principal problema que surge al utilizar un tubo capilar como elemento de expansión, es su escasa capacidad de control y gestión del sistema. Además, y por lo que se ha llevado a cabo el primer banco de ensayos, la termodinámica asociada a los tubos capilares utilizados en refrigeración doméstica, es complicada debido a la expansión bifásica que sufre el flujo al atravesarlo. Debido a la existencia tanto de líquido como de vapor y a su utilización como intercambiador intermedio, pueden surgir problemas como la transferencia de calor invertida (la línea de succión caliente al tubo capilar en lugar de calentar el tubo capilar a la línea de succión), o el problema debido a la aparición de ruido debido a la re-condensación en el capilar, que reduce de manera apreciable la eficiencia del intercambiador generado entre el tubo capilar y la línea de succión.

3.5.1. Investigaciones precedentes

Distintas investigaciones sobre el problema del ruido en la re-condensación del flujo en el momento en que se produce la transferencia de calor, exponen que el fenómeno deja de ser visible si existe un adecuado subenfriamiento a la entrada del dispositivo de expansión. Esta consideración lleva a pensar que la inexistencia de líquido subenfriado a la entrada del tubo capilar podría hacer aparecer este fenómeno.

Inan *et al.* [5], visualizaron con un sistema de rayos X y comprobaron que al principio de poner en marcha el compresor, había líquido a la entrada del capilar, pero que tras unos minutos fueron capaces de medir un subenfriamiento de hasta 5K y observaron que el capilar estaba completamente lleno de líquido.

También Boeng and Melo [6], investigaron para obtener la combinación óptima de carga de refrigerante junto a la elección del tubo capilar y llegaron a los resultados de que hasta con un subenfriamiento de 5K, no conseguían tener un flujo monofásico y además el título de vapor en la entrada del capilar era entre un 2% y 12% al depender de la carga de refrigerante que se utilizaba. Los autores expusieron que podría ser debido a que el flujo en estado de no-equilibrio, estaba formado por líquido subenfriado y vapor saturado, en lugar de ser solamente líquido.

Ambas investigaciones aportaron resultados que no dejaban clara la postura en cuanto a los datos necesarios para erradicar los problemas que surgen en la re-condensación, problemas que tienen consecuencias como la disminución de la eficiencia y que por tanto crean la necesidad de poder medir y analizar las condiciones reales del refrigerante a la entrada del tubo capilar y también a la salida del condensador. Esto ha llevado al IIE, a efectuar el primer banco de pruebas para conseguir resultados relevantes respecto a este problema.

3.5.2. Banco experimental realizado en el IIE

El IIE, para la realización de las pruebas experimentales ha tenido que crear un banco de ensayos con la dificultad añadida de que las partes que querían ser estudiadas, debían permitir ver el flujo que pasaba a través de éstas. Para poder visualizar esas zonas, se han modificado distintas partes del sistema original. A la salida del condensador y a la entrada del tubo capilar, se le han añadido secciones transparentes, ya que eran las zonas donde se quería comprobar el flujo. Además, se ha añadido una sección para ensayar distintas posiciones del filtro que tiene el tubo capilar a su entrada y también para distintas posiciones del capilar.

En la Figura 3.16. Se puede apreciar la zona del condensador que se ha modificado para que el flujo pudiera ser visible, por lo que, este tramo se ha realizado con un tubo transparente de material termoplástico PFA (perfluoroalcoxi). Este material es idóneo al ser fácilmente conformable, al tener un reducido coeficiente de rozamiento y una baja reactividad química con otros compuestos.

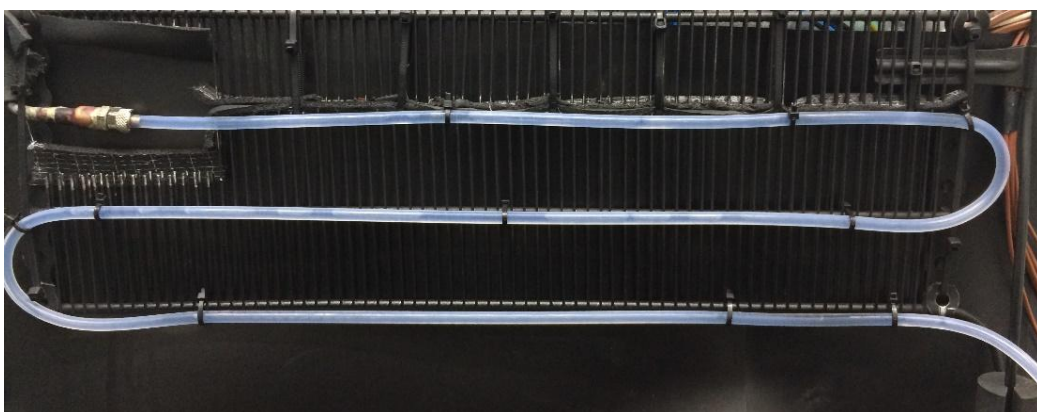


Figura 3.16 Tramo del condensador transparente.

Para poder desmentir que el filtro actuase como acumulador, también éste se ha realizado en material transparente, en cuyo interior se encontraba un material anti humedad llamado Zeolita, como se puede observar en la Figura 3.17. Para mantener el material filtrante, se han colocado anillos de cobre y una malla metálica a cada lado. El filtro al disponer del material Zeolita en forma de pequeñas bolitas, evita que pueda entrar posible humedad o residuos sólidos. Esta modificación se ha llevado a cabo para poder comprobar el tipo de flujo a la entrada del tubo capilar.

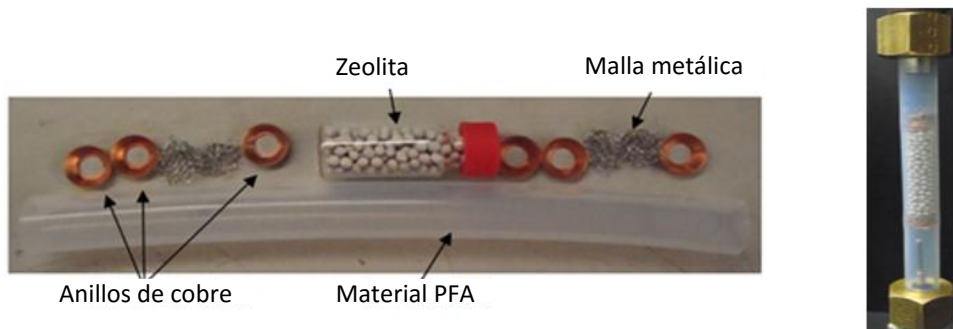


Figura 3.17 Filtro transparente realizado en el primer banco de pruebas.

La investigación se ha centrado en la visualización del flujo a la entrada del capilar. Para poder comprobar de manera adecuada el flujo en el capilar, se han establecido 9 configuraciones diferenciadas. Se han colocado 3 filtros distintos con 3 posiciones diferentes del capilar dentro de cada filtro. Siendo tres de estas configuraciones mostradas a continuación en la siguiente Figura 3.18.



Figura 3.18 Posición de filtros y capilares.

Además del conjunto de válvulas que han permitido cambiar de capilar, el frigorífico ha estado controlado por electrónica que ha permitido controlar la temperatura de cada compartimento de manera independiente.

Como se han colocado filtros en tres posiciones distintas, junto con cada filtro se ha añadido un tubo capilar diferente. Para poder situarlos en la línea de succión de manera adecuada, se ha colocado cada tubo capilar a 120° de los otros dos, Figura 3.19. Esta parte del circuito, no se puede ver a simple vista, al estar muy próxima al evaporador y este encontrarse oculto en el interior del frigorífico doméstico.

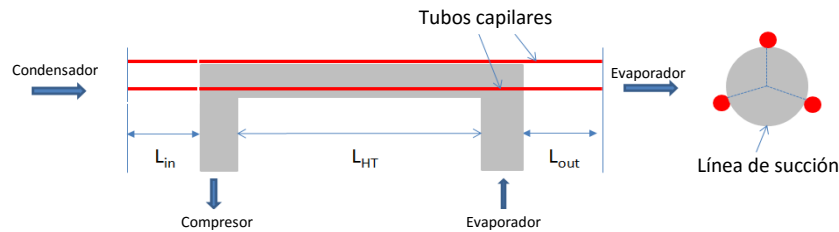


Figura 3.19 Colocación de los tubos capilares en la línea de succión.

La expansión original se ha generado mediante un tubo capilar que intercambia calor con la línea de succión, pero se ha sustituido por la instalación experimental donde se han colocado tres tubos capilares de 2.44 metros y con un diámetro interno de 0.6 milímetros, enrollados sobre la entrada al compresor (línea de succión) como se puede ver en la Figura 3.20. En este esquema, se detallan, las posiciones de los elementos utilizados como instrumentación. Para la medida de temperatura, se han utilizado termopares tipo T (cobre-constantán), para poder estudiar el perfil de temperatura a lo largo de todo el condensador (T1-T8), así se puede comprobar el inicio del subenfriamiento. Además, estos elementos de medida se han colocado antes y después de cada dispositivo para poder controlar cualquier anomalía, este procedimiento se ha seguido durante todo el proyecto. Como es necesario calcular el subenfriamiento y sobrecalentamiento para la realización de los estudios, se ha colocado un transductor de presión en las zonas de alta y baja presión que permitan conocer, a partir de la presión de alta, la temperatura de saturación de líquido (P2) y con la presión de baja, la temperatura de saturación de vapor (P1). A partir de la diferencia de temperaturas entre la temperatura de saturación del condensador y la temperatura medida con el termopar T8, se obtiene el subenfriamiento y el sobrecalentamiento se obtiene siguiendo el mismo procedimiento, pero a partir de las temperaturas de saturación del evaporador y la temperatura del termopar T_{evap outlet}.

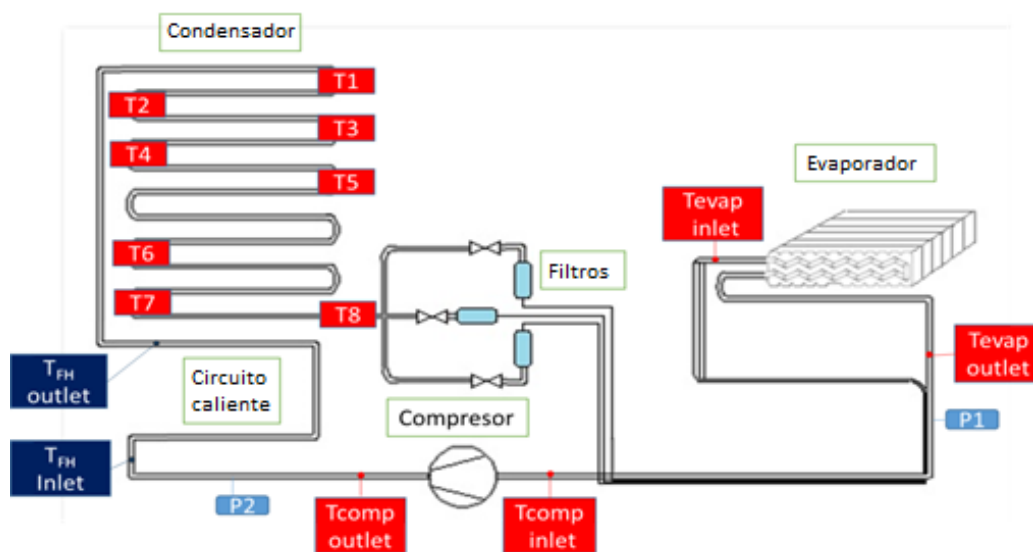


Figura 3.20 Esquema banco de ensayos inicial.

Para las medidas de presión se ha utilizado un transductor de presión de la marca Emerson Rosemount. Estos transductores tienen una precisión de $\pm 0.065\%$ del rango de medida, siendo un rango de 0-6 bar.

Tras la fabricación de los distintos elementos transparentes, para poder visualizar el flujo en los puntos que han de ser comprobados, y la colocación de los elementos necesarios como las válvulas o los elementos de medida. Se ha llevado a cabo la construcción del primer banco de ensayos quedando como aparece en la Figura 3.21.

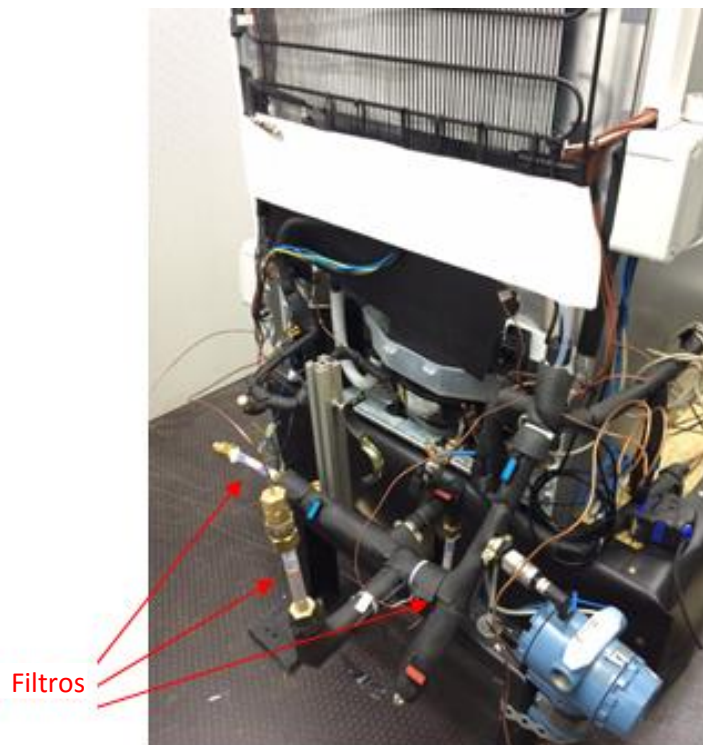


Figura 3.21 Primera instalación experimental.

El flujo ha podido circular a través de uno de estos tubos capilares gracias a una configuración de válvulas y tuberías que han permitido establecer la selección de uno de los tres. Antes de cada tubo capilar se encontraba un filtro en una posición diferente a las otras dos, estando uno en posición horizontal y los otros dos en posición vertical con sentido de flujo contrario. Estas posiciones han permitido observar si ha tenido o no efecto la posición del filtro sobre el flujo a la entrada del tubo capilar.

Durante toda la etapa experimental, se ha utilizado la misma carga de refrigerante y las mismas condiciones de temperatura ambiente. Por tanto, lo primero que se ha realizado ha sido un barrido de carga, aumentando la carga de refrigerante progresivamente, para establecer la carga óptima de refrigerante, obteniéndose una carga óptima de 57 gramos de refrigerante. La temperatura de la cámara climática ha sido de 25°C , siguiendo la normativa vigente para los ensayos en frigoríficos.

3.5.3. Resultados y discusión tras la primera instalación experimental

Con la creación del banco de ensayos, se ha podido comprobar que, realizando un barrido de carga, el subenfriamiento se incrementaba. Este hecho es correcto, ya que la carga está claramente relacionada con el subenfriamiento y a mayor carga debe haber también un mayor subenfriamiento. Al tener más carga, aumenta la presión de saturación y, por tanto, la temperatura de saturación. Esto genera un aumento en el subenfriamiento como se puede apreciar en la siguiente Figura 3.22 al comparar las dos gráficas, siendo la primera con carga óptima y la segunda con una carga superior a la óptima.

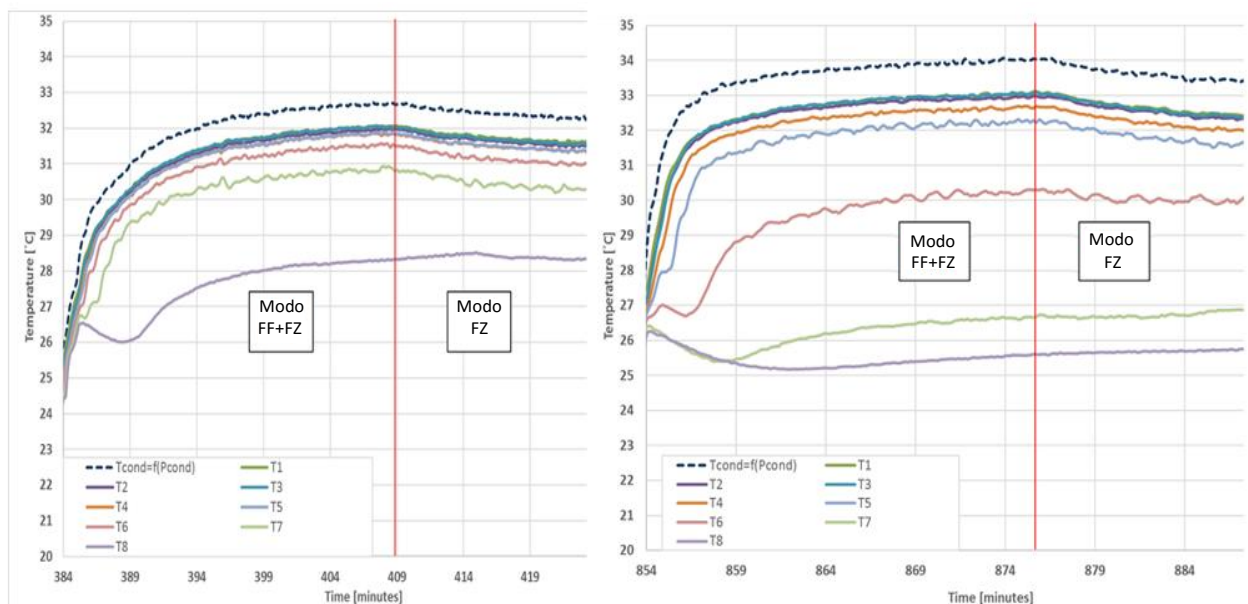


Figura 3.22 Gráficas del perfil de temperatura del condensador a diferente carga.

Como se ha explicado anteriormente, al hacer referencia a la Figura 3.22, el subenfriamiento con carga óptima es aproximadamente de 4K, mientras que con una carga superior es de 6K.

Pero al construir el tramo transparente, se ha podido comprobar que, a pesar de existir subenfriamiento y por tanto, todo el flujo debería estar en estado líquido, no es así como se puede observar al realizar zoom en una sección del tubo transparente, Figura 3.23. Se puede apreciar como el flujo es bifásico, y no completamente líquido como debería ser.



Figura 3.23 Zoom tramo condensador transparente.

Para desmentir que el filtro actuase como un acumulador de líquido, se ha comprobado mediante la variación interna del capilar en el interior del tubo, que se generaba un vórtice justo a la entrada del tubo capilar y además se ha observado que el filtro siempre tiene una cantidad constante tanto de vapor como de líquido. Este hecho ha manifestado, que siempre succionaba una cierta cantidad de vapor, por lo que había un flujo bifásico en el tubo capilar. Así se ha demostrado que la posición del filtro no influye.

Para poder calcular el título de vapor a la entrada del capilar, se ha llevado a cabo el segundo banco de ensayos, donde se ha diseñado y construido una nueva instalación para poder conocer el calor real que se cede mediante el intercambiador original. A partir de la primera instalación experimental se ha creado un condensador de tubos gemelos, que intercambia el calor con agua en vez del aire ambiente como hacía el condensador original, el circuito auxiliar utilizado para el agua, también ha sido necesaria su construcción. Para lograr esta segunda instalación experimental, se ha realizado un prediseño de la instalación para poder seleccionar los componentes que se iban a utilizar y una vez conocidos estos elementos, se ha llevado a cabo el diseño de la instalación. Con el diseño realizado, se ha construido el condensador equivalente al original y el circuito auxiliar de agua y la remodelación sobre el circuito original.

4. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

4.1. Descripción general de la Instalación

La instalación experimental siendo su rediseño y construcción en lo que ha consistido el presente trabajo. Está compuesto por una serie de sistemas que se diferencian debido a su función. El banco de ensayos está formado por cuatro circuitos, siendo:

- Circuito Frigorífico.
- Circuito auxiliar de agua.
- Sistema eléctrico de seguridad y maniobra.
- Sistema para el control y la adquisición de datos.

Se ha llevado a cabo el diseño de la instalación completa necesaria, para la creación del segundo banco de ensayos.

Para realizar el diseño de la instalación se ha utilizado el programa Microsoft Visio 2016, ya que este programa permite crear un esquema donde se pueden situar todos los componentes que son necesarios. Este esquema permite tener una idea y una vista global de cómo va a ser la instalación.

La representación esquemática facilita de un modo notable la visualización de todos los componentes y también permite modificar los circuitos de manera cómoda y rápida debido a una posible modificación del circuito real.

El diseño de la instalación se ha basado en la utilización de un circuito auxiliar de agua para el intercambio de calor.

Para llevar a cabo un buen prediseño de los dos circuitos, es necesario situar a ambos lados de cada elemento que se ubique sobre el esquema, dos válvulas de seccionamiento. Estas válvulas permiten extraer cada elemento del circuito con facilidad por si fuera necesario sustituirlo o incluso no instalarlo finalmente. Si se necesita que un elemento sea reemplazado, se puede cerrar las válvulas que se encuentran a cada lado del dispositivo y así no hay problema de fuga de refrigerante o agua.

A continuación, se va a explicar detalladamente cada sistema, puntualizando los cambios realizados sobre el banco inicial y exponiendo los detalles de los distintos elementos utilizados.

El circuito completo formado por la parte de refrigerante y la parte de agua se detalla en la Figura 4.1.

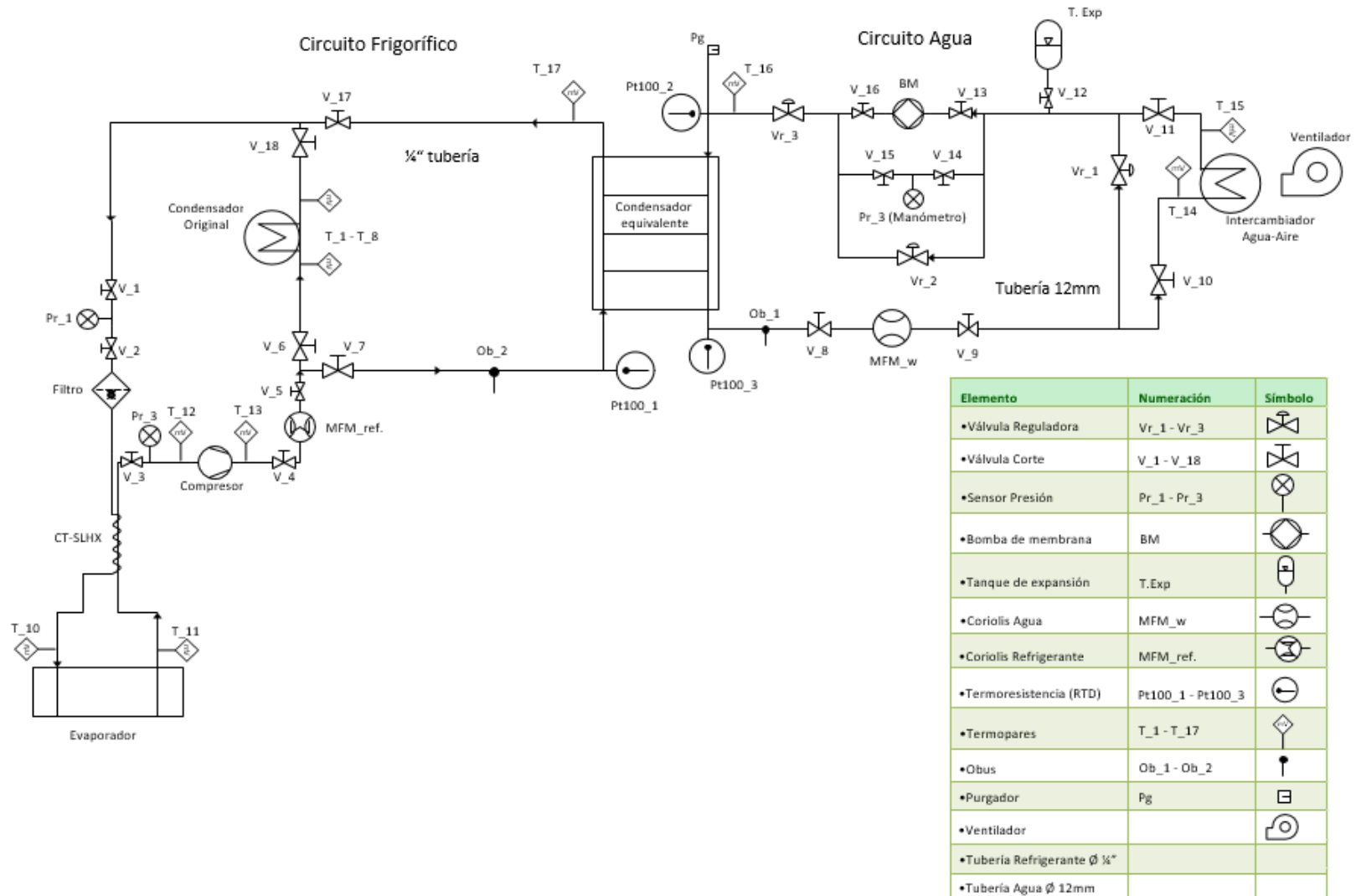


Figura 4.1 Esquema general instalación experimental.

4.2 Circuito refrigerante

4.2.1 Descripción del circuito frigorífico

El circuito refrigerante es la parte con mayor relevancia en el banco de pruebas, ya que los resultados y estudios obtenidos, se basan en el funcionamiento de este circuito. Es en este circuito donde se produce el ciclo de refrigeración. Para esta parte se ha utilizado una nevera compuesta por parte frigorífica y congelador, alimentado con refrigerante R600a. Tiene los componentes típicos de un frigorífico como son: el condensador, evaporador, compresor y dispositivo de expansión, como se puede ver en la Figura 4.2.

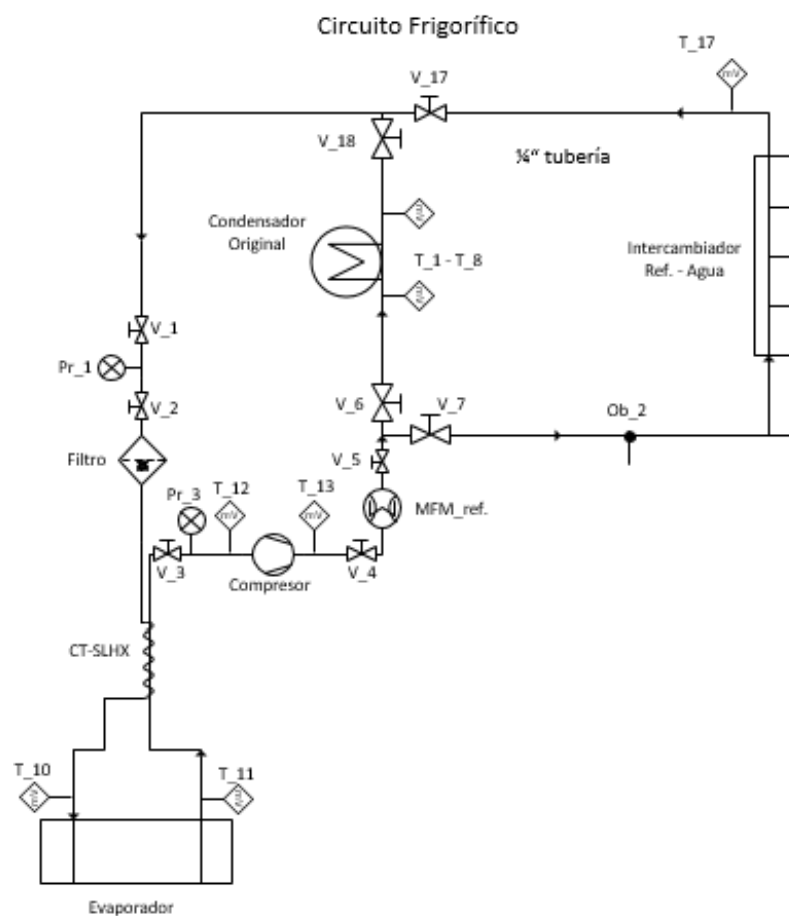


Figura 4.2 Esquema circuito refrigerante.

Uno de los principales cambios que se ha producido sobre el frigorífico original frente a uno convencional de alta eficiencia, radica en la construcción de un condensador equivalente al original que intercambia el calor con un circuito auxiliar de agua. Otro cambio importante es la utilización de un tramo de tubo transparente entre la salida del condensador y la entrada al tubo capilar.

4.2.2 Componentes circuito refrigerante

Compresor

El vapor de refrigerante proveniente del evaporador a baja presión y temperatura se introduce en el compresor a través de la entrada o la línea de succión donde es comprimido aportándole alta presión y temperatura. El vapor a alta presión y temperatura es descargado al condensador a través de la línea de descarga.

El compresor que se ha utilizado, Figura 4.3, es el original que viene de fábrica, compresor hermético de la marca Embraco, modelo VEMC7C, con una capacidad de 7 cm³, que trabaja con corriente alterna a 230V, con refrigerante R600a y tiene la posibilidad de modificar la velocidad a la que trabaja (40-150 Hz) gracias a un variador de frecuencia.



Figura 4.3 Compresor Embraco utilizado en la instalación experimental.

A la salida del compresor se ha situado un medidor de flujo para poder conocer exactamente la carga de refrigerante que se está utilizando.

El recipiente transparente que se encuentra encima del compresor, es utilizado para evaporar el agua que se ha desescarchado del evaporador. Un conducto vierte el agua en el recipiente, alrededor de este pasa la tubería con refrigerante que sale del compresor a alta temperatura y consigue evaporar la pequeña cantidad de agua que se puede encontrar.

Condensador

El condensador original, se ha puenteado para poder realizar el intercambio de calor según se requiera, mediante el condensador original o a través de los dos tubos gemelos con el circuito auxiliar de agua. Este condensador adicional se ha diseñado y construido para poder medir de manera exacta el calor que se intercambia a partir del condensador original. El diseño del condensador equivalente, se detalla en el punto 4.3.

Dispositivo de expansión

Este frigorífico inicialmente utilizaba como dispositivo de expansión un tubo capilar para aportar la caída de presión necesaria. Aunque como se ha mencionado, en el primer banco de ensayos se han colocado tres tubos capilares, cada uno con un filtro en distintas posiciones. Para el segundo banco de pruebas permanecen dos tubos capilares. Ambos tubos capilares tienen una posición vertical con sentido descendente del flujo. Tras el primer banco de pruebas se ha pensado que el tubo capilar puede ser poco restrictivo por lo que, para comprobarlo, manteniendo para ambos la misma longitud (2.44 m), uno de los tubos se ha reducido su diámetro interno a la mitad. Dejando uno de 0.6mm y el otro de 0.3mm. Así se va a poder comprobar el correcto funcionamiento del tubo capilar como dispositivo de expansión.

Evaporador

Es el elemento compuesto de un conjunto de lazos de tuberías que se encarga de absorber el calor latente que hay en el conjunto frigorífico-congelador y así conseguir que baje su temperatura.

El evaporador es un elemento que se encuentra oculto, situado en el interior del congelador como se puede observar en la Figura 4.4, por lo que para poder acceder a él primero hay que extraer unos tornillos que lo mantienen gracias a una tapadera.



Figura 4.4 Compartimento del evaporador doméstico utilizado.

Ventilador

Es un dispositivo utilizado para la distribución del aire frío que está en contacto con el evaporador. Por lo tanto, se encuentra también en el compartimento del congelador. En el frigorífico se encuentra detrás del evaporador y recoge el aire a través del ventilador y lo envía a través de una boquilla de distribución al compartimento congelador. Mediante electrónica se activa el ventilador y se controla su velocidad para aportar más o menos caudal de aire frío al congelador. Los elementos se pueden ver en la Figura 4.5.

Este sistema donde se utiliza un ventilador para la distribución del frío, es el llamado sistema No Frost. Este sistema se basa en enfriar únicamente en el congelador y distribuir el aire frío a los dos compartimentos, evitando que se forme escarcha.



Figura 4.5 Ventilador encargado de la distribución de aire.

Refrigerante

El refrigerante es el medio de transmisión de calor, es el encargado de sufrir las distintas transformaciones que se realizan a lo largo del ciclo de refrigeración, siendo por ello un elemento importante. Debido a las actuales restricciones impuestas por la Unión Europea, realizando cambios de normativa. Se han sustituido los refrigerantes convencionales por otros que tuvieran un impacto ambiental menor. Estos cambios han sido necesarios debido a que los refrigerantes que normalmente se utilizaban (R12 o R134a) tenían un alto impacto medioambiental. En la instalación frigorífica, se ha utilizado como fluido el refrigerante R600a (Isobutano). En la siguiente Tabla 4.1, se muestran sus principales características, comparadas con otro refrigerante extensamente utilizado. La carga de refrigerante en condiciones normales es de 0.355 g/s.

Refrigerante	R-600a	R-134a
Nombre	Isobutano	1.1.1.2-Tetra-fluoroetano
Peso molecular en Kg/Kmol	58.1	102.0
Temperatura crítica en °C	135	101
Presión a 20°C en bar (absoluto)	3.0	5.7
Punto de ebullición en °C	-11.6	-26.5
Densidad del líquido a -25°C	0.6	1.37
Ozone depletion potential (ODP)	0	0.055
Potencial de calentamiento atmosférico (PCA)	3	1430

Tabla 4.1 Características del refrigerante R-600a.

Como se puede comprobar, en cuanto al impacto medioambiental, el refrigerante R-600a tiene un PCA más de mil veces inferior al del R134a, además de no dañar al ozono por una posible fuga de refrigerante a la atmósfera.

El refrigerante R600a, proviene de los gases del petróleo por lo que se establece como natural, es un refrigerante con una densidad baja en comparación con el R-134a por lo que, para cargar la misma cantidad, se requiere menor cantidad de masa, aunque al calcular el volumen necesario, resulta ser prácticamente el mismo.

Su reducido nivel de presión conlleva al evaporador a trabajar en condiciones por debajo de la atmosférica, por lo que puede conllevar cambios en el diseño. La relación entre la baja presión y la alta temperatura crítica permite tener buena capacidad de enfriamiento, incluso con altas temperaturas de condensación.

Un inconveniente de este refrigerante es, su elevada inflamabilidad, por lo que debe tenerse precaución con su uso.

Para llevar a cabo la carga de refrigerante en la instalación experimental, se utiliza una balanza de precisión y una botella de refrigerante R-600a.

4.3 Intercambiador refrigerante – agua

Para poder medir el calor con mayor precisión que con el aire ambiente, se ha construido un intercambiador que mediante la instrumentación instalada va a permitir medir el calor que se cede al circuito auxiliar. Con ello se busca una explicación más precisa sobre las condiciones reales a la entrada al capilar. El esquema de esta parte de la instalación se representa en la Figura 4.6.

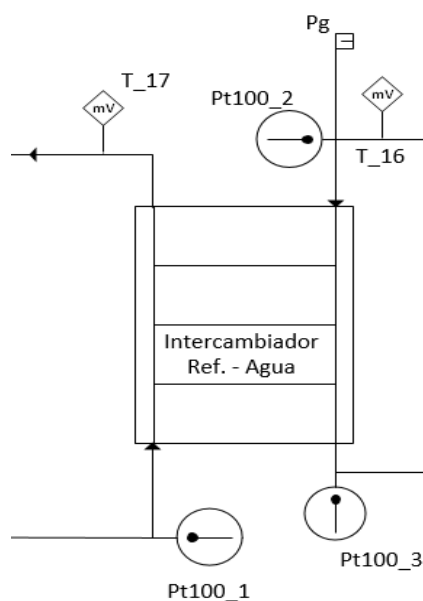


Figura 4.6 Esquema Intercambiador mediante tubos gemelos.

Para llevar a cabo el intercambio de calor entre los dos circuitos, se ha realizado el diseño de un intercambiador mediante tubos gemelos. Se define intercambiador de tubos gemelos ya que el intercambiador se efectúa mediante la utilización de dos tubos idénticos y se suelda uno junto al otro para poder transferir el calor. Para evitar que el calor se pierda en el intercambio con el ambiente, hay que conseguir buena protección térmica. Gracias a su reducida conductividad, el material utilizado para aislar el intercambiador mencionado, es Armaflex® de 19mm de espesor. Además, el flujo que pasa por uno de los tubos va en sentido contrario al flujo de su tubo gemelo (contracorriente). Todo ello se puede apreciar en la siguiente Figura 4.7.

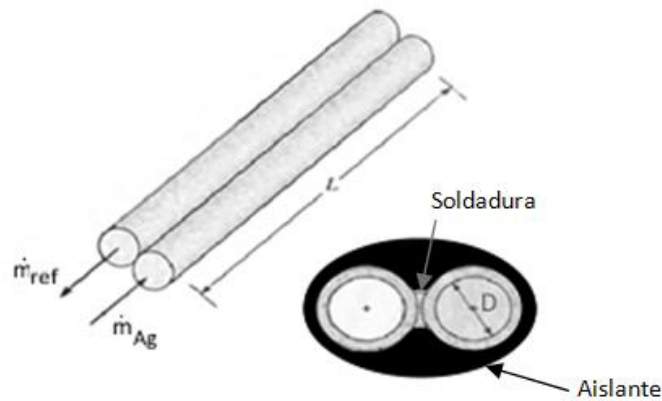


Figura 4.7 Esquema tubos paralelos. [10]

El establecer los flujos a contracorriente permite transmitir el calor de uno a otro mediante conducción de una manera más rápida, evitando así una mayor longitud de tubos. Se puede observar en la Figura 4.8, donde se comparan ambas posibilidades a igualdad de longitud de tubería, el eje vertical marca la temperatura y el flujo de menor temperatura es el inferior.

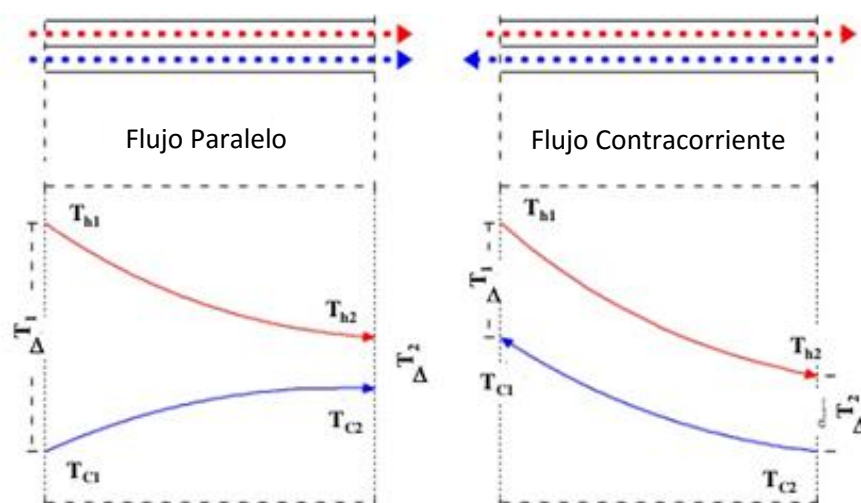


Figura 4.8 Diferencia intercambio debido al sentido de flujo. [11]

Queda demostrado que mediante flujos paralelos la temperatura final del flujo frío (T_{c2}) es inferior que cuando se trabaja con flujo a contracorriente por lo que, a igualdad de temperatura del flujo superior, se va a conseguir transmitir más calor mediante flujo contracorriente.

Con este intercambiador se puede medir de manera más precisa el calor que se cedería por el intercambiador original de la nevera con el ambiente.

Para conseguir la medición precisa de temperatura se han utilizado a la entrada de ambos circuitos y también a la salida del circuito de agua unas termoresistencias que proporcionan medidas con un error menor que los termopares, pasando de ± 0.5 a ± 0.3 °C.

La longitud y diámetro del intercambiador, se ha obtenido a partir de programa de apoyo en la resolución de ecuaciones no lineales (EES). Este software de cálculo, tiene especial interés para el área térmica, ya que su base de datos contiene las principales características físicas de los fluidos utilizados con frecuencia, como, por ejemplo; agua, refrigerantes, gases reales, etc.

Para el cálculo de la longitud del condensador equivalente, precisa conocer algunos datos que reduzca el número de incógnitas. El diámetro del condensador se ha establecido en 3/16", para conseguir que tenga la misma sección al condensador original. Además del diámetro, se han requerido datos de calor ($Q=58W$), temperatura de condensación refrigerante ($T_{cond}= 33^{\circ}C$), temperatura de entrada del agua al condensador ($T_{ag}= 25^{\circ}C$) y la variación de agua en el lado de agua ($\Delta T= 8^{\circ}C$). Estos datos se han obtenido en el primer banco de pruebas, al realizar ensayos con carga óptima.

A partir de estos datos, se ha obtenido una longitud del condensador refrigerante-agua de 2.5 metros.

El mismo programa, ha permitido obtener el caudal máximo y mínimo fijando la longitud del tubo capilar. Para ello, partiendo de los valores obtenidos en los ensayos realizados en el primer banco de pruebas, se marcan unos rangos máximos y mínimos de los valores anteriores. Estos límites permiten conseguir el caudal de agua máximo en 0.01806 l/seg.

Las características del intercambiador diseñado, se muestran en la siguiente Tabla 4.2

Intercambiador Refrigerante-agua.	
Tipo	Flujo contracorriente
Material	Cobre
Longitud (metros)	2.5
Diámetro interno (pulgadas)	3/16

Tabla 4.2 Características del condensador equivalente.

4.4 Circuito auxiliar de agua

Al tener que construir un intercambiador en paralelo al original, también se ha construido el circuito que se encargase de hacer circular el fluido que absorbe el calor extraído del condensador frigorífico.

Este circuito está compuesto de los elementos necesarios para cualquier circuito que precise mover un flujo hidráulico a través de una conducción. También contiene dispositivos que nos permiten poder controlar el caudal o la temperatura, el esquema se puede ver en la Figura 4.9.

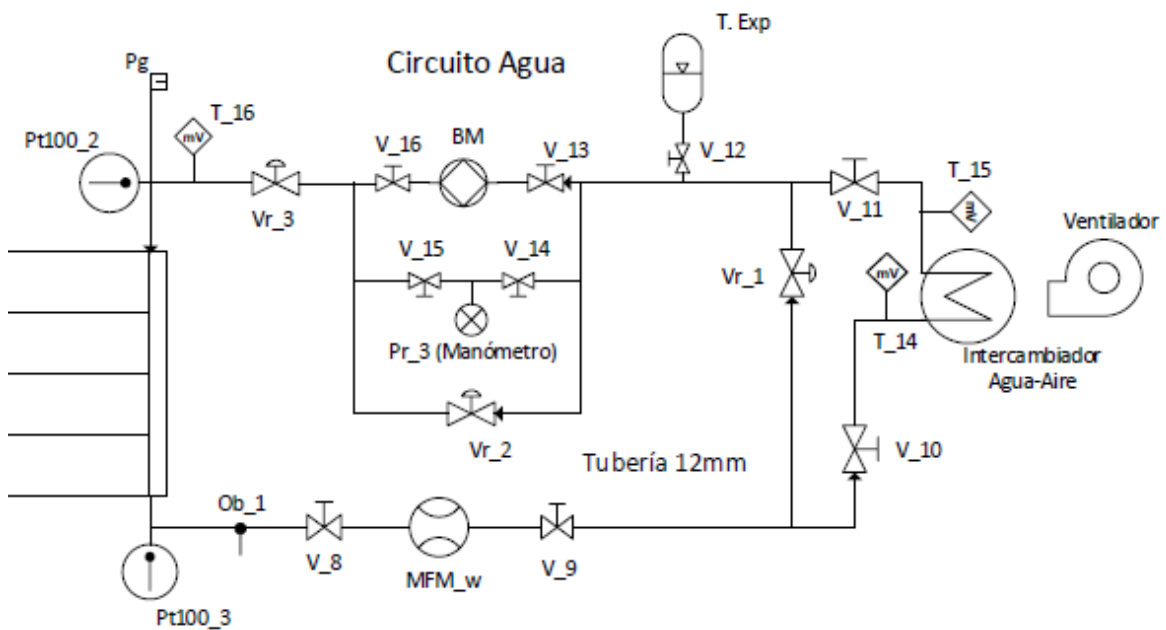


Figura 4.9 Esquema diseño circuito auxiliar de agua.

Podemos conocer este calor si tenemos el salto de temperatura (ΔT), sabiendo que es agua conocemos el calor específico (C_e) y conociendo el caudal (m_f).

$$Q = m_f \cdot C_e \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Bomba

La bomba es el dispositivo necesario para conseguir aportar la energía necesaria para vencer las pérdidas que va sufriendo el flujo a través de todo el circuito auxiliar como en los posibles codos, instrumentación de medida, elementos de regulación o las pérdidas que genera la rugosidad que siempre está presente en los tramos de tubería.

Al ser un circuito cerrado la bomba aporta la energía necesaria para vencer esas pérdidas anteriormente citadas.

Para este circuito se ha utilizado una bomba Flojet, modelo D3131H5011AR, de desplazamiento positivo de tipo diafragma simple. La bomba precisa una fuente de alimentación de 12 Voltios y 7 Amperios de corriente continua. La selección de la bomba, ha sido a partir del cálculo del caudal máximo de agua. Con este caudal y conociendo; las longitudes, diámetro interno y rugosidades, se han obtenido las caídas de presión por fricción, en los tramos de tubería, en el condensador equivalente y en el aerotermo. La elección de la bomba se ha obtenido del trabajo final de grado de Decio Russo [15].

La bomba aporta al circuito una presión de 4.2 bar, suficiente para el circuito auxiliar que se ha llevado cabo en la instalación experimental. Externamente está protegida por una carcasa por lo que no deja ver el interior donde se encuentra la membrana, Figura 4.10.



Figura 4.10 Bomba de membrana simple.

La bomba trabaja con un caudal de $5.3 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$, aunque la instalación de agua precisa un caudal máximo de $1 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$. La utilización de una bomba que aporte el caudal deseado, al ser tan reducido, conllevaría un sobrecoste. Este sobrecoste puede ser evitado y así se ha conseguido al comprar una bomba que aportase un caudal un poco mayor.

Para lograr el caudal deseado, hay que crear un bypass que permita regular el caudal que finalmente entrega la bomba (Q_2). La bomba envía un caudal (Q_b) pero parte es devuelto a la entrada de la bomba. El caudal que sale de la bomba tiene más presión (P_2) que el de antes de la bomba (P_1) por lo que a través del bypass consigue volver a la entrada de la bomba ($P_2 > P_1$). El flujo devuelto (Q_3) será aplicando la ley de continuidad, la diferencia entre el que da la bomba (Q_b) y lo que no se recircula (Q_2), siendo en este circuito de $4.3 \frac{\text{litros}}{\text{min}}$. Este caudal recirculado (Q_3) se puede considerar como una pérdida, ya que se le aporta una energía que solo sirve para volver a la entrada. Este funcionamiento se puede observar en la siguiente Figura 4.11.



Figura 4.11 Esquema de representación del Bypass a la bomba.

Su funcionamiento se basa en una máquina de movimiento alternativo, donde se empuja una membrana en dos sentidos. Para conseguir que el flujo sea siempre de alta presión a baja, se utilizan 2 válvulas de retención. La explicación anterior se ha representado en la siguiente Figura 4.12.

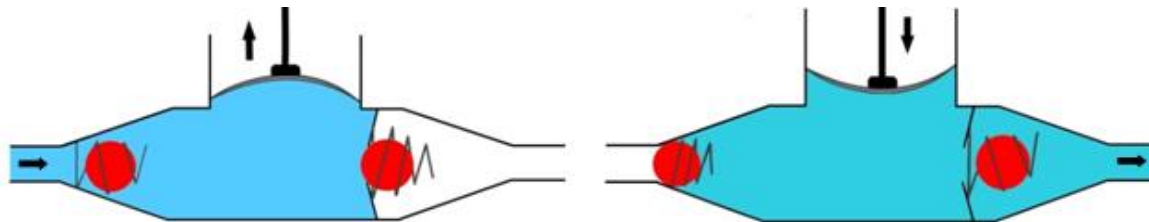


Figura 4.12 Representación esquemática bomba membrana.

La bomba al estar funcionando de manera continua necesita un elemento que evite un sobrecalentamiento excesivo, por lo que se ha colocado un ventilador para que refrigere la parte que tiende a aumentar su temperatura y que podría provocar el fallo.

Tanque de expansión

El tanque de expansión es un elemento de protección de la instalación donde se sitúe.

La función que tiene es la de proteger la instalación contra posibles sobrepresiones provocadas por un aumento de la temperatura. Al aumentar la temperatura, el volumen del fluido debe aumentar, pero no puede al ser una instalación rígida, por lo que incrementa su presión. Esto puede provocar el fallo de algún elemento del circuito hidráulico. Este fenómeno tiene resultados muy perjudiciales para la instalación pudiendo llevarla al colapso. El funcionamiento del elemento es el de conseguir mantener más o menos constante la presión del circuito evitando así el fenómeno anteriormente descrito.

A partir de la norma UNE podemos conocer el volumen mínimo que tiene que tener el tanque de expansión para absorber las posibles variaciones que sufre el fluido caloportador al modificarse su temperatura.

Para obtener el vaso de expansión, se realizaron los siguientes cálculos siguiendo los pasos expuestos en la norma UNE 100155:2004: Al tratarse de un vaso de expansión cerrado, la fórmula necesaria es:

$$V_n = C_e \cdot V \cdot C_p \quad (4.1)$$

Siendo:

V_n: Volumen total del vaso de expansión.

V: Volumen total de agua en el circuito.

C_e: Coeficiente de expansión.

C_p: Coeficiente de presión.

Cálculo del volumen total de agua en el circuito.

A partir de los metros de tubería total (l≈7metros) y de su radio (r=12mm); obtenemos una aproximación al volumen total de agua que habrá en la instalación.

$$V = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot l}{1000} \quad (4.2)$$

Al sustituir en la ecuación (4.1) los datos y dividiendo por mil para tener todo en las mismas unidades, obtenemos un volumen total de 0.92 litros, para los cálculos se ha cogido el valor de 1 litro.

Coeficiente de expansión.

Este coeficiente tiene en cuenta la variación de volumen que sufre el agua al cambiar su temperatura, es un valor entre 0 y 1.

Conociendo el rango de temperatura a la que se va a encontrar el fluido, podemos conocer el coeficiente de expansión, el fluido se va a encontrar como máximo a 50°C y como mínimo a 20°C

Necesitamos conocer el C_e aplicado a la temperatura media, por lo que buscamos el valor C_e(35°C), según la norma, podemos aplicar la siguiente fórmula para valores de temperatura entre 30 y 120 °C siendo:

$$C_e = (3,24 \cdot t^2 + 102,13 \cdot t - 2708,3) \cdot 10^{-6} \quad (4.3)$$

Siendo t la temperatura media; en nuestro caso t= 35°C, obtenemos un valor C_e de 0.0048.

Coeficiente de presión.

Para calcular el vaso de expansión, hay que tener en cuenta los límites de presión a los que se va a someter el fluido de trabajo al vaso de expansión.

Según la norma UNE, el coeficiente de presión se obtiene a partir de:

$$C_p = \frac{P_M}{P_M - P_m} \quad (4.4)$$

Siendo:

P_M : Presión máxima en el vaso.

P_m : Presión mínima en el vaso.

Suponiendo una presión máxima de 4 bar y mínima de 0.5 bar obtenemos un C_p de 1.143.

Ahora a partir de estos valores, podemos calcular el volumen mínimo que tiene que tener el tanque de expansión para proteger a la instalación a partir de la fórmula descrita (4.1).

Aplicando los datos anteriormente calculados, se obtiene un volumen mínimo necesario en el tanque de expansión de 0.0055 litros. Conociendo el volumen mínimo y las presiones a las que puede someterse el fluido, ya se está capacitado para elegir un tanque que proteja la instalación.

A partir de los datos calculados, se ha elegido el tanque Ibaiondo modelo miniflex 16 bar V-160, ya que cumple todos los requisitos necesarios para nuestra instalación, siendo además de tamaño reducido según catálogo (altura de 105 mm), importante para su colocación en el circuito.

Aunque el fabricante lo determina como antiarriete, también se puede utilizar como vaso de expansión como se ha utilizado en este circuito. Ya que, debido al reducido tamaño de la instalación, no se va a producir un golpe de ariete, pero sí puede producirse un fallo por el gradiente de temperatura.


Como la instalación es reducida, el tanque de expansión no precisa gran volumen para proteger el circuito, por lo que tiene un tamaño reducido como se puede apreciar en la Figura 4.13.

ACUMULADORES HIDRONEUMÁTICOS

AHN (antiarrietes)


Antiarrietes hidroneumáticos de membrana Conducciones de agua

- Su función es reducir a valores admisibles las ondas de sobrepresión y depresión que se propagan por las tuberías
- Membrana recambiable apta para agua potable o especial para aguas residuales
- Conexión de agua embreadada o roscada según modelo
- Temperatura: -10° C +100° C
- Pintura epoxi roja
- Precarga de aire: según modelo
- Certificado CE, conforme a la Directiva 97/23/CE



Modelo miniflex 16 bar

Peso (Kg)	Código	Modelo	Capacidad (Lt)	Presión Máx. (bar)	Dimensiones		Conexión agua R
					Ø D (mm)	H (mm)	
0,5	07000691	V-160	0,16	16	85	105	1/2"
0,5	07000692	V-160 CMR	0,16	16	85	105	1/2"



- Manguito de acero Inoxidable (AISI 304) y membrana no recambiable
 - Modelo V-160: fondo inoxidable; Modelo V-160 CMR: fondo pintado en blanco

Figura 4.13 Características del tanque de expansión utilizado. [12]

Condensador

El condensador está formado por los tubos gemelos anteriormente descrito en el punto 4.3.

Al permitir la transferencia de calor, esencialmente mediante conducción a través del contacto entre las dos tuberías del intercambiador, como el fluido refrigerante está a mayor temperatura, el flujo de agua tiende a incrementar su temperatura. Cumpliendo así la función que realizaría el aire en un refrigerador convencional. Gracias a este condensador, se va a poder medir las condiciones reales del condensador original cuando intercambia calor con el aire.

Aerotermino

Elemento que cumple la función de evacuar el calor del circuito mediante intercambio con el ambiente con flujo forzado de aire proveniente de un ventilador. Este intercambiador, Figura 4.14, está formado por un tubo curvado donde se ha añadido una superficie de aluminio que facilita el intercambio de calor.



Figura 4.14 Aerotermino utilizado para el circuito de agua.

Las características del intercambiador agua-aire que se ha utilizado, a partir del programa se detallan en la siguiente Tabla 4.3. Su cálculo se ha realizado en el trabajo final de grado de Decio Russo [15].

Intercambiador Agua-aire.	
Tipo	Tiro inducido
Material	Cobre
Longitud (metros)	5
Diámetro interno (mm)	9.5

Tabla 4.3 Características del Aerotermino utilizado.

Para evitar que el flujo de aire, que proporciona el ventilador, se dispersase antes de llegar al aerotermino, se ha diseñado un conducto para dirigir al flujo de aire directamente al intercambiador. Este conducto se ha realizado mediante aislante de fibra de vidrio con capa de

aluminio. El esquema de diseño se muestra en la Figura 4.15. Ha sido diseñado mediante la aplicación del software Autodesk Inventor 2014.

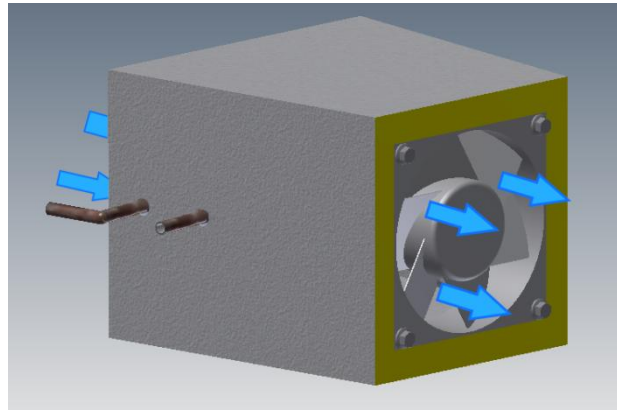


Figura 4.15 Conducto aire forzado para Aerothermo.

Bypass del intercambiador aire-agua

Para conseguir un salto de temperatura suficiente entre la entrada y la salida del condensador equivalente, se ha establecido una temperatura de 25°C a la salida del aerotermo, ya que es el límite debido a que es la temperatura de la cámara frigorífica. Para poder controlar la temperatura, se ha realizado un bypass a la entrada del intercambiador agua-aire, creando otra alternativa al fluido sin pasar por el aerotermo. El bypass está controlado por una válvula reguladora de caudal, que distribuye el flujo por ambos caminos en función de la apertura de la válvula. Esta válvula, al abrirla, limita el paso de flujo por el aerotermo, por lo que el agua caliente que llega al bypass, una parte se dirige al intercambiador y la otra no pasa por él. El flujo de agua que no atraviesa el intercambiador no varía su temperatura, mientras que la cantidad de agua que sí lo traspasa, sufre una notable disminución de temperatura.

Por tanto, con la apertura o cierre de la válvula de regulación situada en el bypass, podemos controlar la temperatura del flujo antes de su entrada a la bomba. Este funcionamiento se muestra en la Figura 4.16.

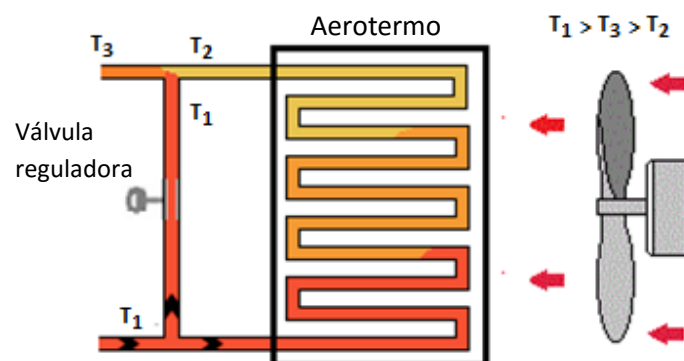


Figura 4.16 Esquema funcionamiento Bypass.

4.5 Instrumentación

4.5.1 Transductores de temperatura

Para la toma de medidas de temperatura, se han utilizado dos dispositivos diferentes, estos elementos son esenciales para poder realizar estudios de los ensayos que se van a realizar.

Termopares

Los termopares son sensores de temperatura que se han llevado a cabo a partir de la unión de dos metales diferentes. Esta unión en función de la temperatura a la que se encuentre, produce un voltaje, esto es el llamado efecto Seebeck, Figura 4.17. El voltaje que se genera, depende del gradiente de temperatura que existe entre los extremos, enviando una señal aproximadamente proporcional a la temperatura del punto de medida. El termopar mide la diferencia de temperatura entre los dos extremos, por ello uno de los extremos es la referencia (compensación de la zona fría), y el otro es el que se encuentra en el lugar que queremos medir. Si tenemos el extremo de referencia a una temperatura conocida, podemos conocer el valor de la tensión que va a generar. Cuando tenemos el voltaje que se genera en el punto a medir, ha de restarse el voltaje de la zona de referencia, obteniéndose así la medida absoluta de temperatura. Hoy en día, los instrumentos de medida llevan una compensación electrónica.

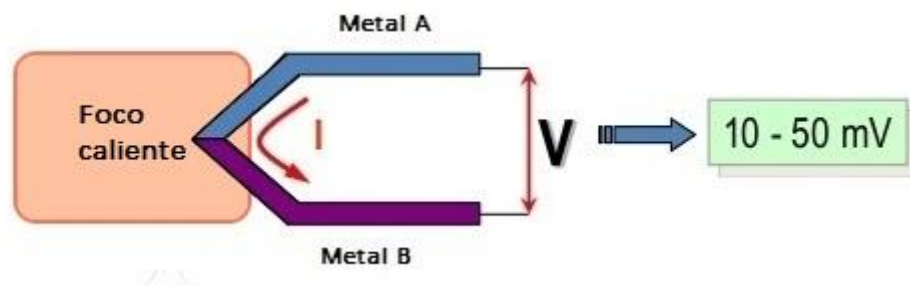


Figura 4.17 Efecto Seebeck en termopares.

Para poder conocer la temperatura en distintos puntos de la instalación, se han utilizado termopares de tipo T (cobre-constantán), los cuales están contruidos en un mismo cable aislante, donde se encuentran dos conductores, siendo el positivo cobre, y el conductor negativo está formado por una aleación de 60% de cobre, siendo el porcentaje restante de níquel. Estos sensores tienen un rango de aplicación -200 hasta 370°C, no pueden medir a temperaturas mayores, ya que el cobre se oxida y falsea la medida. Estos sensores de temperatura tienen una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Termoresistencias

Como es necesario una alta precisión para la medida de temperatura tanto a la entrada como a la salida de los tubos gemelos utilizados como condensador. Para el intercambio de calor entre el refrigerante y el agua, se han utilizado termoresistencias Pt100 de cuatro hilos.

El funcionamiento de estos dispositivos se basa en la medida de la variación de una resistencia que se modifica en función de la temperatura. La termoresistencia es un alambre de un metal, normalmente platino, al ser más preciso y con mayor rango de operación que el níquel o cobre que son otros metales también utilizados como termoresistencias. No necesitan una referencia para conectarlas a la unidad de medida. Por lo que se conectan directamente.

Las termoresistencias están formadas por un tubo protector metálico de acero inoxidable o aleaciones, estando en la punta el sensor. Su construcción puede estar realizada en dos, tres o cuatro cables, siendo la última configuración la que más precisión aporta.

La conexión de cuatro cables es la más precisa, al ser capaz de eliminar de manera completa el error que se genera por la conexión con el instrumento de medida. Su funcionamiento se basa en la utilización del puente de *Wheatstone*.

Las termoresistencias que se eligieron para la medida son de platino de 4 cables, Figura 4.18, tienen una precisión a 0°C de ± 0.03 °C y precisión a 100°C de ± 0.08 °C. Estas termoresistencias tienen un rango de aplicación lineal de -75 a 350 °C. El fabricante es TC-SA y a partir de catálogo, permite elegir parámetros de las termoresistencias como el grosor de la sonda, el número de cables o la longitud del cable.



Figura 4.18 PT100 utilizada en la instalación experimental.

Este rango de temperatura permite llevar a cabo los ensayos, ya que la temperatura de trabajo no va a ser superior y tampoco inferior a los límites. Además, para evitar la propagación de errores, la precisión debe ser muy alta, por ello se ha elegido esta sonda de temperatura.

Además de las características de medida, debido a la sección reducida de las tuberías (1/4") donde deben medir las sondas, se han tenido que elegir sondas con una sección fina, siendo el diámetro de 3mm.

4.5.2 Medidores de caudal másico

Para la medida de flujo se utiliza un caudalímetro. La medida de caudal másico tanto de agua como refrigerante, son variables muy importantes a la hora de realizar cálculos, por lo que se ha requerido la utilización de unos caudalímetros de alta precisión. La medida del sensor, es enviada a un dispositivo de adquisición de datos en forma de señal de 4-20 mA.

El principio de funcionamiento, es el efecto coriolis que se basa en medir el desfase entre la vibración de los dos extremos de la tubería interna del sensor. Este movimiento es causado por el aumento o disminución de momento de inercia de la masa de fluido según está aproximándose o alejándose del centro de rotación.

La colocación de los caudalímetros viene determinada por el fabricante, siendo distinta según el estado del fluido que va a atravesarlo. El fabricante indica una posición preferente y dos alternativas para cada estado. Estas posiciones, se indican en las hojas de características de los medidores de caudal como se puede ver en la siguiente Figura 4.19, donde el fabricante indica la posición preferente para fluidos en estado líquido (izquierda) y gaseoso (derecha). Además, el fabricante indica el sentido que tiene que tener el fluido al atravesarlo.

Cuando el flujo de trabajo se encuentra en otro estado, la orientación preferente cambia, como se puede observar en la Figura 4.19 (derecha), al tratarse en este caso de un fluido gaseoso.

Table 1-3: Preferred sensor orientation










Process	Preferred orientation	Alternate orientations	
Liquids			
			
			

Table 1-3: Preferred sensor orientation










Process	Preferred orientation	Alternate orientations	
Gases			
			
			

Figura 4.19 Orientación preferente para líquido (izquierda) y gases (derecha).

En la instalación experimental se han utilizado dos medidores de caudal. El caudalímetro seleccionado para ambos circuitos tiene la misma apariencia, Figura 4.20, pero se trata de dos modelos diferenciados. Ambos son del fabricante Emerson, dentro de la sección MicroMotion, siendo el modelo del circuito de refrigerante el CMFS010 y el modelo de agua el CMFS015, estos modelos varían en el rango de medida disponible. Ha sido necesario la utilización de dos modelos distintos debido al reducido caudal másico que circula de refrigerante (0.355 g/s) en comparación con el flujo de agua (18.916 g/s) en condiciones normales. Pudiendo ser la reducción del caudal de refrigerante hasta 0.0575 g/s, que es inferior al mínimo permitido en el modelo CMFS015. Como cada circuito tiene un caudal distinto, cada medidor tiene un rango de medida diferente estos datos se detallan en la siguiente Tabla 4.4.



Figura 4.20 Caudalímetro Emerson MicroMotion CMFS. [16]

Para poder mantener los caudalímetros se han construido unas bases a partir de perfiles de aluminio Rexroth y tuercas en forma de T.

Caudalímetros		
	Agua (CMFS015)	Refrigerante (CMFS010)
Caudal Máximo (g/s)	133.33	0.8
Caudal Mínimo (g/s)	0.154	0.04
Error (%)	0.1	0.25

Tabla 4.4 Características de los caudalímetros utilizados en la instalación.

4.5.3 Transductor de presión

Para la medición de la presión se utiliza un dispositivo llamado transductor de presión, que transforma la variación de presión en una señal de intensidad entre los 4-20 mA y ésta se traduce obteniendo la medición de presión. Puede medir presión manométrica o absoluta, midiendo dentro de un rango. Es necesario conocer el valor de esta presión para saber la presión de condensación y evaporación.

Para la instalación experimental, se han utilizado dos transductores de presión, ambos en el circuito de refrigerante. Colocando uno en el lado de alta y otro en el lado de baja.

El transductor que se ha utilizado para el lado de alta, es un transductor de la marca Setra, modelo C280E, Figura 4.21. Es necesario que tome las medidas con precisión, ya que ésta es la presión de saturación a la salida del condensador (P_c). Con esta presión y conociendo el tipo de fluido, podemos conocer la temperatura de saturación (T_c) a la que estaría el fluido en condiciones de líquido saturado y gracias a la termoresistencia que se ha situado a la salida del condensador del circuito de refrigerante, podemos conocer la temperatura real a la que sale el fluido (T_{sal}). Con estos datos podemos calcular el valor del subenfriamiento (SE) del circuito mediante la diferencia de estas temperaturas.

$$SE = T_{Sal} - T_C \quad (5.1)$$

Este transductor tiene una precisión de $\pm 0.073\%$ del rango, permitiendo así una medida exacta. El rango de medida es de 0-100 Psi (0 - 6.89 bar) en presión absoluta.



Figura 4.21 Transductor Setra C280E.

El otro transductor utilizado es un Emerson PT5-07M, Figura 4.22. Este medidor de presión se ha ubicado en la línea de succión midiendo la presión de baja del circuito refrigerante. Este transductor ha permitido a partir del procedimiento aplicado para obtener el subenfriamiento, obtener el sobrecalentamiento. La medida de presión es enviada a partir de una señal de 4-20 mA.



Figura 4.22 Transductor Emerson PT5-07M. [17]

Este transductor, tienen un rango de medida de -12 a 102 Psi (-0.8 a 7 bar) en presión relativa. La precisión de las medidas tiene un $\pm 1\%$ del rango.

4.6 Sistema de adquisición de datos

Para obtener los datos de los ensayos realizados, se ha utilizado el data logger de Agilent 34970A, este dispositivo transfiere los valores al PC para poder ser procesados.

El data logger utilizado, Figura 4.23 izquierda, tiene gran flexibilidad gracias a la capacidad del dispositivo para intercambiar las tarjetas de adquisición de datos. Tiene tres multiplexores de 22 canales HP 34901A permitiendo un escaneo de 60 canales por segundo. Este dispositivo permite la entrada de termopares, termoresistencias de 2 y 4 hilos, termistores, voltaje y corriente alterna y continua.

Para la reproducción de los datos en el PC, se emplea el software BenchLink Data Logger 3 de Agilent Technologies, que permite representar información de hasta 4 data logger Agilent 34970A o 34972A, guardar los datos, analizarlos o exportarlos, se muestra una captura de pantalla del software en la Figura 4.23 izquierda.



Figura 4.23 Data logger de Agilent 34970A(izquierda) y captura de pantalla software BenchLink Data Logger 3 (derecha).

Cada dispositivo de medida transfiere una señal de una forma específica. Cada tarjeta tiene 22 canales siendo 20 para señales de tensión y 2 para señales de intensidad de corriente. La señal que envían los termopares es de voltaje, cada termopar se conecta a un canal de la tarjeta para su transferencia de información. Las termoresistencias también envían los datos en forma de voltaje, sin embargo, siguiendo las instrucciones del fabricante, éstas deben ser conectadas en 2 canales, y además estos canales tienen que estar separados diez posiciones. Por último, los transductores de presión y los caudalímetros, envían la señal en forma de corriente por lo que deben ser situados en los canales 21 o 22.

El sistema de adquisición de datos permite un máximo de tres tarjetas (multiplexores), en este caso han sido utilizadas las tres tarjetas de un data logger, siendo suficiente para la instalación. El primer número de los canales hace referencia a la tarjeta a la que pertenece, por lo que va de 1 a 3, siendo los otros dos números los utilizados para indicar el canal.

A continuación, se muestra la Tabla 4.5, donde se detallan todos los canales utilizados para la adquisición de datos en la instalación experimental.

1ª Tarjeta			2ª Tarjeta			3ª Tarjeta		
Nº Cable	Localización/nombre	Canal	Nº Cable	Localización/nombre	Canal	Nº Cable	Localización/nombre	Canal
000	T_R1	Ch 101	100	T_inlet comp.	Ch 201		Termorresistencia	Ch 301
001	T_R2	Ch 102	101	T_outlet comp.	Ch 202		Verde_rojo naranja_Compresor	Ch 302
002	T_Control_FF	Ch 103	102	T_inlet_MFM_Ref.	Ch 203		Blanco_rojo azul_Válvula	Ch 303
003	T_Control_FZ	Ch 104	103	T_outlet_MFM_Ref.	Ch 204		Amarillo rojo_rojo gris_Motor Damper	Ch 304
004	T_F1	Ch 105	104	T_Cond_1	Ch 205		Rojo_rojo blanco_Heater Damper	Ch 305
	T_Ref_cap06_Inlet	Ch 106	105	T_Cond_2	Ch 206		Morado_azul_Defrost Damper	Ch 306
	T_W_Pr_outlet	Ch 107	106	T_Cond_3	Ch 207		Naranja_amarillo_Fan	Ch 307
	T_Ref_Pr_inlet	Ch 108	107	T_Cond_4	Ch 208		Marrón_negro_Contacto Damper	Ch 308
	T_W_Pr_Inlet	Ch 109	108	T_Cond_5	Ch 209		Gris_blanco negro_Señal compresor	Ch 309
	Libre	Ch 110	109	T_Cond_6	Ch 210		Libre	Ch 310
	Libre	Ch 111	110	T_Cond_7	Ch 211		Termorresistencia	Ch 311
	Libre	Ch 112	111	T_Cond_8	Ch 212		Aire_entrada	Ch 312
	Libre	Ch 113	112	T_inlet_evap.	Ch 213		Aire_salida	Ch 313
	Libre	Ch 114	113	T_outlet_evap.	Ch 214		T_F_Camara 1	Ch 314
	Libre	Ch 115	114	T_F_outlet vent.	Ch 215		T_F_Camara 2	Ch 315
	T_Ref_cap06_Inlet	Ch 116	115	T_W_inlet	Ch 216		Glicol entrada	Ch 316
	T_W_Pr_outlet	Ch 117	116	T_W_outlet	Ch 217		Glicol salida	Ch 317
	T_Ref_Pr_inlet	Ch 118	117	T_Ref_inlet	Ch 218		T_F_Camara 3	Ch 318
	T_W_Pr_Inlet	Ch 119	118	T_Ref_outlet	Ch 219		Centro	Ch 319
	Libre	Ch 120		Libre	Ch 220		T_F_Camara 4	Ch 320
	Libre	Ch 121		Presión baja	Ch 221		Mdot_W	Ch 321
	Libre	Ch 122		Presión alta	Ch 222		Mdot_Ref	Ch 322

Tabla 4.5 Situación de los dispositivos en las tarjetas del data logger.

4.7 Sistema de control

4.7.1 Cámara climática

Es utilizada para establecer las condiciones de temperatura ambiente idóneas para poder realizar los ensayos. La temperatura ambiente durante los ensayos en frigoríficos debe estar estable a +25 °C, siguiendo la normativa UNE-EN 62552:2014.

Para lograr mantener estable la temperatura, la cámara cuenta con una estructura de aislamiento mediante paneles de poliuretano con densidad de 40 kg/m³ y una capa de aluminio. Para lograr las condiciones establecidas, la cámara cuenta con una batería regulada con un flujo de agua caliente o fría en función de la temperatura del interior, este flujo es controlado automáticamente. Además, existe un ventilador que se encarga de recircular el aire al interior de la cámara en las condiciones establecidas para el ensayo.

4.7.2 Temperatura Interna Frigorífico-congelador

Para poder realizar los ensayos en el banco de prueba se requiere fijar y controlar la temperatura del interior del frigorífico-congelador. Para ello, se ha utilizado un PID para cada compartimento que regula una resistencia de 200W situada en su interior. Los PIDs seleccionados son de la marca Watlow, EZ-ZONE® modelo PM6C1FJ-AAAAAAA, que permiten el control tanto manual como automático.

El funcionamiento en ambos compartimentos se basa en la medida de la temperatura mediante un termopar, este le envía directamente al PID la señal de temperatura. A partir de la señal de temperatura, el PID regula la resistencia situada en el interior del frigorífico y del congelador para mantener la temperatura estable, Figura 4.24. Este proceso es necesario para lograr la realización de los ensayos estáticos.

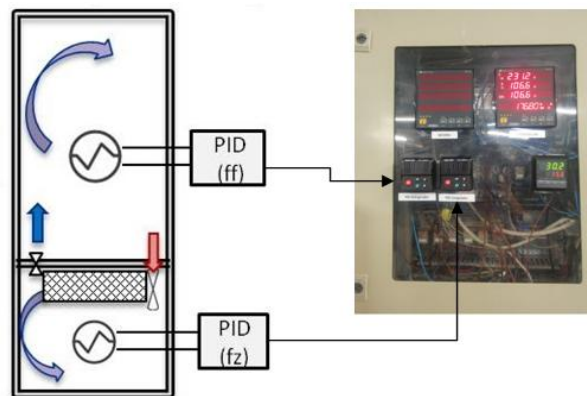


Figura 4.24 PIDs utilizados en la instalación experimental.

4.8 Elementos auxiliares

Además de todos los componentes mencionados anteriormente, para cualquier circuito es preciso la utilización de elementos básicos como el conducto por donde circula el caudal, el elemento que permite introducir el fluido o los elementos que permiten el control del flujo.

Obús

Es un elemento necesario para poder introducir en cada circuito el fluido con el que va a trabajar por ello, se han colocado uno para cada flujo.

Purgador

Es el componente necesario para eliminar toda cantidad de aire que pueda quedar en el circuito. El purgador utilizado de la marca Genebre, es un modelo automático con boya que permite el cierre manual, la desaireación automática y de manera continua durante el llenado y, además, facilita la entrada de aire en el vaciado.

Válvulas

Válvula seccionadora. Debido a la existencia de dos fluidos y diámetros diferentes, cada circuito precisa un tipo de válvula. Este tipo de válvula se utiliza para realizar un corte del flujo en el circuito donde está instalada.

Válvula reguladora. Para el circuito de agua, se han utilizado dos válvulas reguladoras utilizadas para crear dos bypass en el circuito auxiliar. Estas válvulas permiten regular las condiciones de trabajo gracias a su apertura y cierre gradual.

Tubería

Para la selección de las tuberías, el circuito de refrigerante ya tenía impuesto el diámetro debido al circuito existente original (3/16"). Para la selección del conducto del circuito auxiliar, la parte de condensador en contacto con el circuito refrigerante se ha descrito en el apartado 4.3 Intercambiador refrigerante-agua. Mientras que los tramos utilizados para la conexión de los diferentes dispositivos necesarios para el circuito, se ha utilizado una tubería de 12mm de diámetro interior. Este diámetro es común en fontanería y permite una buena unión con los elementos. El material utilizado en los tramos de tubería ha sido el cobre, este material ha sido recomendado por el personal de laboratorio debido a su gran versatilidad para este tipo de instalación.

4.9 Representación 3D

Una vez llevado a cabo el diseño del esquema que ha permitido tener en cuenta todos los componentes que han sido necesarios. Se ha realizado la selección de éstos para poder completar tanto el circuito de agua como la extensión llevada a cabo en el circuito principal, ya existente en el frigorífico. Una vez se han completado estos dos pasos, se ha realizado el posicionamiento real de todos los componentes precisos. Para tener una primera visión global del banco, se ha desarrollado un diseño 3D mediante la aplicación de Solidworks 2015. Figura 4.25.

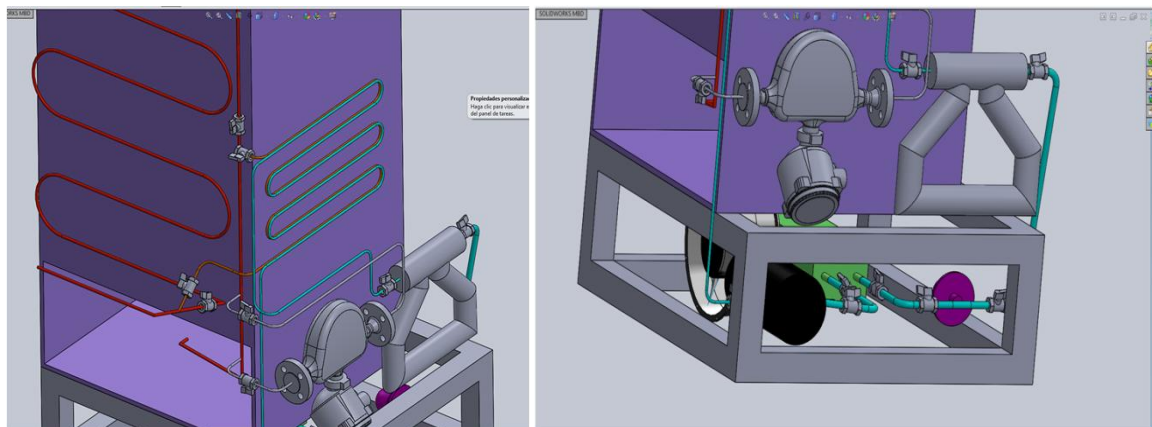


Figura 4.25 Representación 3D banco de pruebas.

5. CONSTRUCCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

5.1. Introducción

Una vez realizado el diseño de la instalación experimental, se ha procedido a la construcción de la misma.

El frigorífico doméstico utilizado para la construcción de la instalación experimental, inicialmente contaba con el primer banco de pruebas detallado anteriormente en el capítulo de antecedentes. Como el segundo banco ha precisado modificaciones, además de utilizar otros elementos de instrumentación, el primer paso ha sido la extracción de estos componentes. Toda la estructura donde se sitúan los filtros y el tubo transparente ha permanecido intacta al ser necesaria para este nuevo banco.

A continuación, se va a exponer el proceso llevado a cabo para la construcción de la instalación experimental.

5.2. Circuito refrigerante.

Esta parte de la instalación experimental, ya contaba con partes realizadas debido al primer banco de pruebas. Por ello, el recorrido que realiza el flujo de refrigerante no ha sufrido demasiados cambios.

El principal cambio que se ha realizado en la construcción del circuito refrigerante ha sido la sustitución de los tres tubos capilares situados en diferente posición, por dos tubos capilares en la misma posición siendo ahora diferente el diámetro interno en los tubos capilares. Este cambio de tamaño no es apreciable a simple vista debido a que los diámetros son muy reducidos, siendo uno de 0.6mm y el otro de 0.3mm. La colocación de los filtros con los tubos capilares se puede apreciar en la siguiente Figura 5.1.



Figura 5.1 Filtros y tubos capilares.

Para la construcción del condensador equivalente, se ha realizado un bypass que permita dirigir el flujo de refrigerante al condensador original o al condensador refrigerante-agua mediante dos válvulas, Figura 5.2.



Figura 5.2 Bypass para condensador Refrigerante-agua.

Para la medida de caudal en este lado de la instalación experimental, se ha colocado según indicaciones del fabricante Emerson. Este caudalímetro se ha colocado a la salida del compresor, el fluido en este tramo se encuentra en estado gaseoso, ya que a la entrada del compresor el flujo debe ser completamente gaseoso y al atravesar el compresor, el fluido se calienta y comprime manteniéndolo en este estado. Siguiendo las recomendaciones del fabricante el medidor de caudal se ha instalado como se puede ver en la Figura 5.3.



Figura 5.3 Colocación del caudalímetro del circuito de refrigerante.

5.3. Intercambiador Refrigerante-Agua.

Esta parte es la más relevante, al ser el tramo donde se van a hacer pasar el refrigerante para poder medir de manera exacta el calor cedido y así comprender la existencia de flujo bifásico a la entrada del tubo capilar.

Para la construcción del condensador equivalente, inicialmente se ha fabricado una plantilla con las medidas del intercambiador, esta plantilla ha permitido ir dándole la forma deseada a los tubos gemelos de manera paralela y permitiendo controlar la medida. Para conseguir que los tubos tuvieran la misma forma, se han ido moldeando ambos tubos a la vez mediante la plantilla y una curvadora que ha permitido realizar los giros de 180°. Para permitir la unión entre ambos tubos, y facilitar la labor de soldadura, se han utilizado bridas. Todo ello se puede observar en la Figura 5.4.

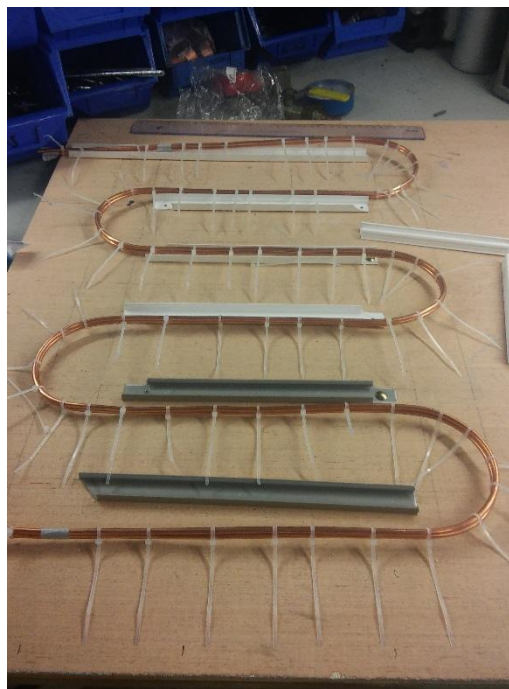


Figura 5.4 Plantilla para la construcción del condensador equivalente.

Una vez se ha conseguido la forma deseada del condensador equivalente, se ha procedido a la unión fija mediante soldadura. Debido a la necesidad de que la unión entre ambos tubos fuera continua para la transferencia de calor, y la importancia de que la unión fuera resistente, la soldadura realizada sobre los tubos gemelos ha sido soldadura fuerte.

Soldadura

Durante el Trabajo Final de Grado, se han tenido que realizar distintos tipos de soldadura, al tener que unir elementos como cables, donde se ha utilizado soldadura de estaño. Pero también se ha tenido que realizar soldadura fuerte al tener que unir elementos que tenían que quedar adaptados perfectamente y que precisaban mayor sustentación en la soldadura, como es el caso de materiales cobre-cobre o cobre-acero. Además, la soldadura cobre-acero no puede llevarse a cabo mediante soldadura de estaño.

Soldadura fuerte

La soldadura fuerte hace referencia a una soldadura a temperatura elevada.

La soldadura del intercambiador de tubos gemelos se ha realizado mediante soldadura fuerte al tratarse de soldadura cobre-cobre. Se ha ejecutado utilizando como material de aporte varillas de cobre con fósforo Y un 5% de plata. La llama del soplete está formada por oxígeno puro (comburente) y acetileno (combustible), que alcanza altas temperaturas de llama, necesarias para conseguir fundir el material de aporte, en este caso, mínimo de 710°C.

El 5% de plata que contienen las varillas de cobre, le confiere a la soldadura mayor dureza y además le permite reducir el punto de fusión del material de aporte. Las varillas de cobre al llevar fósforo, le proporciona la característica de poder soldar cobre con cobre sin la necesidad de una atmosfera protectora. La presencia de fósforo en la aleación, le aporta también propiedades antioxidantes. Las características del material de aporte se muestran en la siguiente tabla, donde se encuentra la composición del material, el diámetro de las varillas y la temperatura de fusión media de la aleación. Tabla 5.1.

Material de aporte	Diámetro	T fusión media (°C)	%Cu	%Ag	%P
AG-5P	2mm	710	89	5	6

Tabla 5.1 Características material de aporte.

El proceso realizado para la unión de los tubos gemelos se puede observar en las siguiente Figura 5.5. Inicialmente se ha llevado a cabo la soldadura en las zonas con mayor conflicto, es decir, las curvas que existen a lo largo del intercambiador. Para ello se ha ido liberando la curva a soldar y mediante unas tenazas se ha ido sujetando para evitar que ambos tubos tuvieran una separación excesiva. Con la unión de ambos tubos se ha procedido a la aplicación de la soldadura. Una vez realizada la soldadura en las curvas, el intercambiador ha sido soldado a lo largo de los tramos rectos. Para esta parte de la soldadura, no se ha precisado de unas tenazas al tener las curvas como puntos de sujeción.

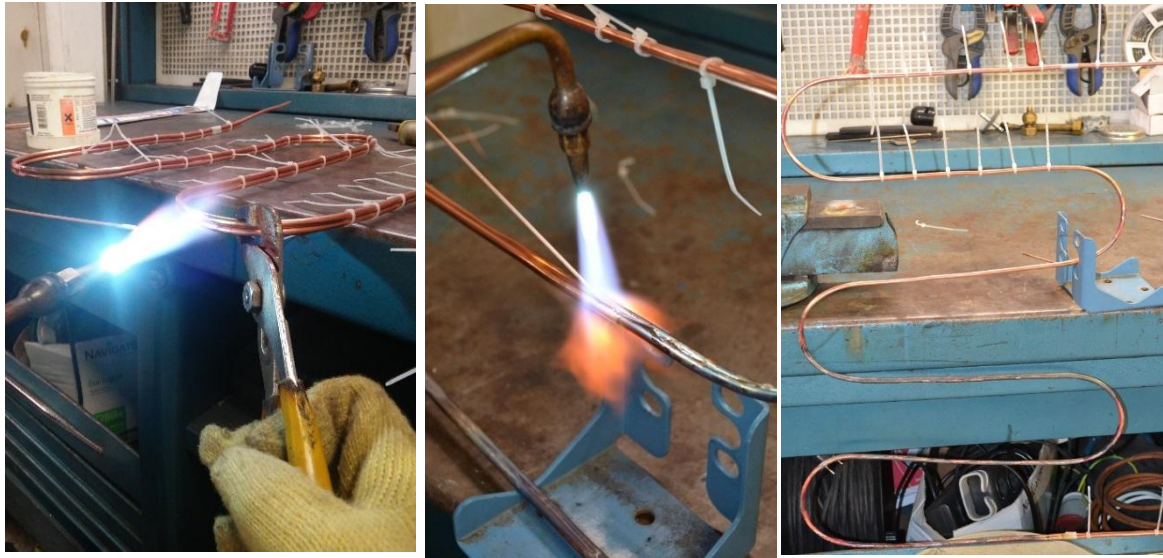


Figura 5.5 Proceso de soldadura del condensador equivalente.

Como se ha comentado, debido a la dificultad y peligrosidad que conlleva la soldadura fuerte, ésta ha sido realizada por un técnico de laboratorio que trabaja dando apoyo en los distintos proyectos que se llevan a cabo en el Instituto de Ingeniería Energética.

Una vez se ha soldado el intercambiador de tubos gemelos, se ha colocado en la instalación experimental. Se ha utilizado un perfil con orificios que mediante una sujeción en cada extremo se ha acoplado al frigorífico. Para mantener el condensador equivalente se han utilizado bridas. Y para evitar las pérdidas de calor por convección a través de las paredes de ambos tubos, se ha utilizado aislante térmico con ambos tubos en su interior. Figura 5.6.



Figura 5.6 Protección térmica y colocación en la instalación.

5.4. Circuito auxiliar agua

Este circuito ha sido construido de manera íntegra. Se ha precisado la realización de este circuito para lograr intercambiar el calor del circuito refrigerante con otro fluido, en este caso agua, que pudiera medirse de manera precisa.

Para tener una mejor disposición del espacio requerido para este circuito, lo primero que se ha llevado a cabo ha sido la construcción de una plataforma para poder colocar el frigorífico-congelador a una altura mayor. Este espacio generado ha permitido introducir gran parte del circuito auxiliar debajo del mismo.

Se ha partido de una estructura ya existente, gracias a que sus medidas eran adecuadas para la instalación. Se ha soldado una base para soportar el peso del frigorífico. Para dar estabilidad y facilidad para la ubicación de los distintos elementos se han colocado dos chapas sobre cada altura que han sido debidamente atornilladas para su sujeción. Para evitar que la soldadura se oxide, se han pintado las distintas zonas soldadas. Se ha colocado la segunda base sobre la que descansará el frigorífico y se le han instalado cuatro ruedas para permitir un fácil manejo de todo el conjunto. El resultado final de la plataforma se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7 Base para la colocación del circuito auxiliar y frigorífico.

Una vez que la plataforma se ha terminado, ya se puede empezar a situar los distintos elementos del circuito auxiliar en su lugar correspondiente. Ese proceso se ha realizado a la vez que se ha construido tanto el intercambiador equivalente como las modificaciones necesarias para el circuito original.

En la base superior de la plataforma se ha situado el frigorífico mientras que en la base inferior de la plataforma se ha situado la bomba, el tanque de expansión, el aerotermo, dos manómetros para una medida directa de la presión y los dos bypass necesarios para controlar la instalación. Estos elementos se han colocado siguiendo el diseño establecido. Figura 5.8 y Figura 5.9.

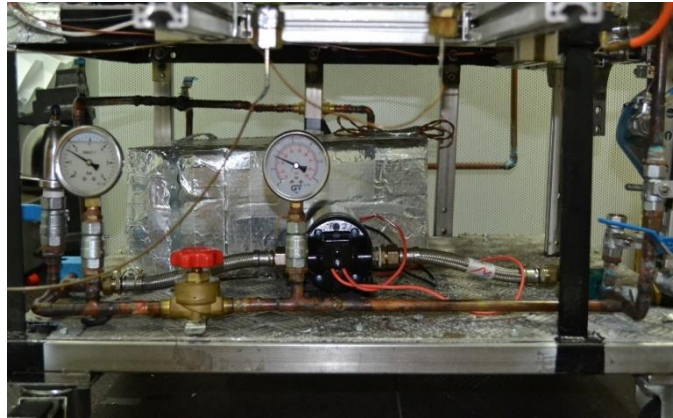


Figura 5.8 Montaje de manómetros, bomba y su bypass.

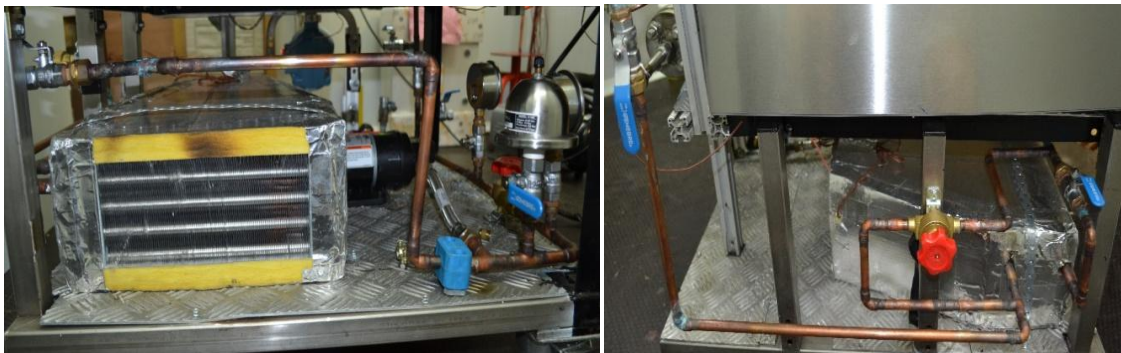


Figura 5.9 Tanque expansión, aerotermo y su bypass.

5.5. Instrumentación

Para poder obtener los resultados de los ensayos realizados sobre el banco de pruebas, es necesario la colocación de elementos que permitan medir las diferentes variables que se requieren. Para esta instalación se ha precisado de dispositivos de medida de temperatura, caudal y presión.

Comprobación de termopares

Debido a la necesidad de medir la temperatura a lo largo de distintos puntos de la instalación experimental, se han utilizado tanto termopares como termoresistencias. Los termopares son de tipo T (60% cobre y 40% níquel) con una precisión en la medida de ± 0.5 °C. A diferencia de las termoresistencias, que no precisan de comprobación alguna, en los termopares si se ha de corroborar de manera adecuada su correcto funcionamiento. Para ello, se han comprobado todos y cada uno de los termopares utilizados en la instalación. Cuando un termopar se construye a partir de cable directo de rollo, en un extremo se acopla la cabeza y en el otro se crea la punta. Este siempre debe ser comprobado y si el cable sufre una modificación en su longitud se debe asegurar de nuevo su funcionamiento.

Los termopares utilizados para la medición de la temperatura no se conectan directamente a las tarjetas de adquisición de datos, sino que van a un bloque isoterma, Figura 5.10, que permite ajustar los valores de temperatura con una sonda patrón, consiguiendo así una mayor precisión de ± 0.3 °C.

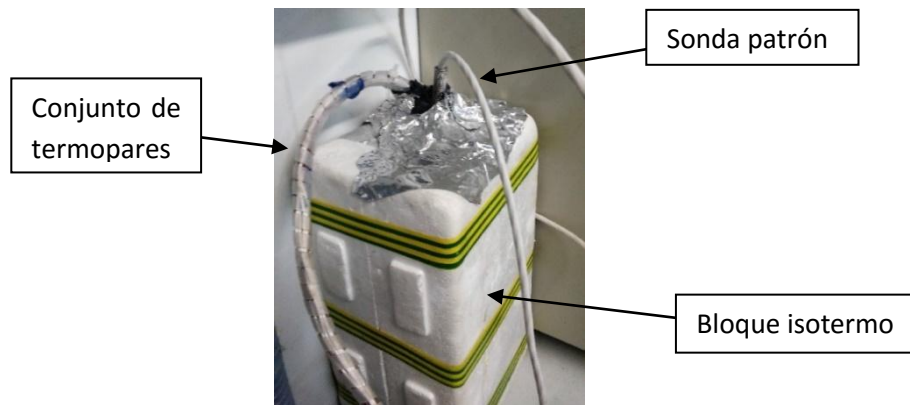


Figura 5.10 Bloque isoterma para la corrección de los termopares.

Los termopares utilizados en la instalación experimental, precisan ser comprobados antes de poder utilizarse. Para ello hay que realizar una serie de pasos que van a ser detallados a continuación.

Para llevar a cabo la comprobación se han requerido distintos componentes, que se muestran en la siguiente Figura 5.11, estos son respectivamente:

Bloque isoterma. Es el recipiente encargado de mantener la temperatura estable en su interior. Para ello, está formado en poliestireno expandido (EPS). Tiene forma de cubo, y se encuentra aislado por todas sus caras. En su interior tiene realizado un agujero de forma cilíndrica donde se vierte el agua y se sitúan los termopares a comprobar. Para la tapa superior, como debe abrirse para poder introducir los termopares, en cada punto de comprobación se aísla mediante Armaflex® y cinta metálica.

Cilindro homogéneo. Este cilindro de acero inoxidable, tiene realizado doce agujeros para poder introducir los termopares a comprobar, el cilindro mantiene la temperatura de forma homogénea y permite una medida más uniforme.

Termómetro digital y sonda de precisión. Este conjunto es el encargado de obtener una temperatura exacta que permita comparar las temperaturas obtenidas con los de cada termopar. Esta sonda tiene gran precisión lo que permite comprobar si los termopares están haciendo una buena medida de temperatura.



Figura 5.11 Dispositivos utilizados para la comprobación de los termopares de la instalación.

Para la comprobación, se han de realizar puntos de control en tres valores de temperatura distintos que contengan todas las posibles zonas de trabajo.

- **Temperatura caliente.** Se establece una temperatura en torno a los 50°C, este punto es el más complicado de controlar debido a las pérdidas inevitables que ocurren en el bloque isoterma, por ello hay que esperar a que se alcance el equilibrio aparente y comenzar con la toma de datos.
- **Temperatura ambiente.** Se vierte agua a temperatura ambiente, suele ser entorno a los 25°C, y se espera a que se mantenga estable. Al estar prácticamente en equilibrio térmico el exterior y el interior del bloque isoterma, se consigue mantener la temperatura prácticamente en equilibrio. Es entonces cuando se pone en marcha la adquisición de datos.
- **Temperatura fría.** Mediante la aportación de hielo, se consigue reducir la temperatura del bloque isoterma entorno a la temperatura de cambio de estado (0°C). En este punto de comprobación además de hielo se añade agua en estado líquido, el hielo consigue reducir la temperatura del bloque a su temperatura de cambio de estado. Una vez se ha logrado estabilizar prácticamente la temperatura del bloque, se puede realizar este punto.

Para la adquisición de datos, se ha utilizado el data logger donde están conectados los termopares, este dispositivo a través del programa BenchLink Data Logger 3, permite exportar los valores de las medidas de cada termopar y compararlos con los datos de la sonda patrón que está en contacto con el agua.

Una vez realizado los tres puntos a distintas temperaturas, mediante la utilización de una hoja Excel, se pueden representar los valores comparando lo que mide la sonda con lo que mide el termopar.

Conociendo el valor que aporta el termopar y la sonda, podemos comprobar su funcionamiento. Es necesario para la consideración de que se realiza una medición correcta, un valor entre la temperatura medida en el termopar de ± 0.3 °C el valor de la sonda, suponiendo esta como el valor de referencia.

A continuación, se muestra un extracto de la comparación entre la sonda patrón y las medidas obtenidas en uno de los termopares utilizados en la instalación experimental. Figura 5.12.

101 (VDC)	101 (°C)	Sonda (°C)
0,00129695	52,823	52,671
0,00129510	52,781	52,671
0,00129576	52,795	52,664
0,00129521	52,784	52,654
-0,00000946	22,253	22,323
-0,00000978	22,245	22,318
-0,00000989	22,243	22,323
-0,00000989	22,243	22,326
-0,00087391	0,334	0,248
-0,00087359	0,343	0,25
-0,00087337	0,346	0,249
-0,00087326	0,349	0,243

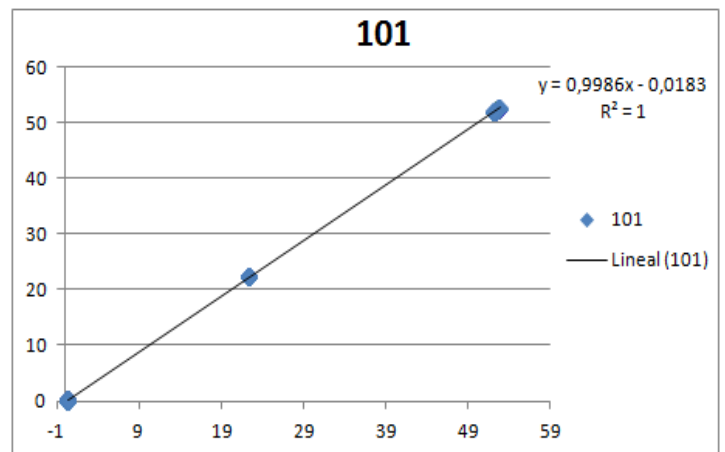


Figura 5.12 Comprobación del termopar en el canal 101 del data logger.

Estos mismos cálculos se han realizado para todos los termopares para comprobar su correcto funcionamiento. A partir de los valores de la ecuación de la recta podemos observar la aproximación que hay entre la medida más exacta (sonda patrón) y la de cada termopar.

Una vez comprobado el funcionamiento de todos los termopares que se han utilizado en la instalación, se ha realizado su colocación según el esquema diseñado. Para mejorar la adquisición se utiliza una cinta que facilita la medida de temperatura, se sujeta el termopar en la posición que se desea medir mediante la utilización de una brida. Se ajusta con cinta metálica y por último se aísla térmicamente mediante Armaflex®. Este proceso de colocación se muestra en la siguiente Figura 5.13.

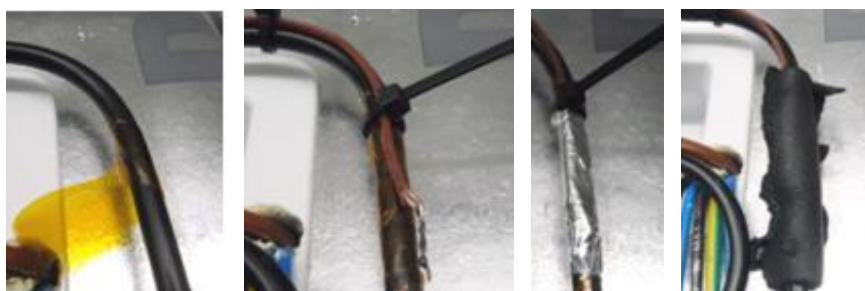


Figura 5.13 Colocación de los termopares utilizados en la instalación experimental.

Termopares, termoresistencias y transductores

Para la adquisición de datos de temperatura y presión se han colocado dispositivos en distintos puntos de toda la instalación. Para su ubicación en cada circuito, se ha seguido el esquema obtenido en la etapa de diseño. En la siguiente Figura 5.14, se muestran los transductores de presión del circuito refrigerante, las termoresistencias utilizadas para la medida precisa de temperatura y la colocación de algunos termopares de la instalación experimental.

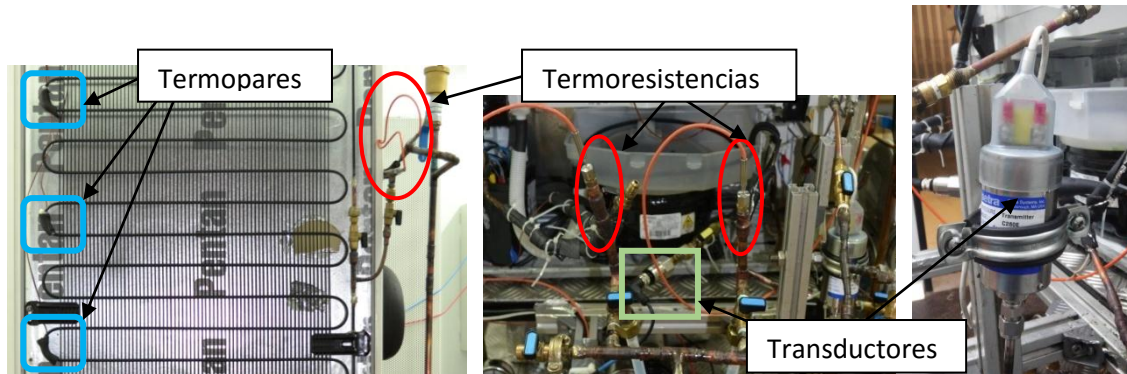


Figura 5.14 Situación de la instrumentación de la instalación.

Coriolis

Para la adquisición de datos de caudal másico, ya se ha mostrado la colocación del caudalímetro utilizado para el circuito refrigerante. Como es imprescindible conocer el caudal que circula por el circuito de agua, al ser el caudal que va a permitir obtener el calor cedido del circuito refrigerante, se ha colocado un caudalímetro siguiendo las instrucciones del fabricante. Durante todo el trayecto, el agua se mantiene en estado líquido por lo que la colocación del caudalímetro tiene una posición diferente al utilizado para el circuito de refrigerante, Figura 5.15.

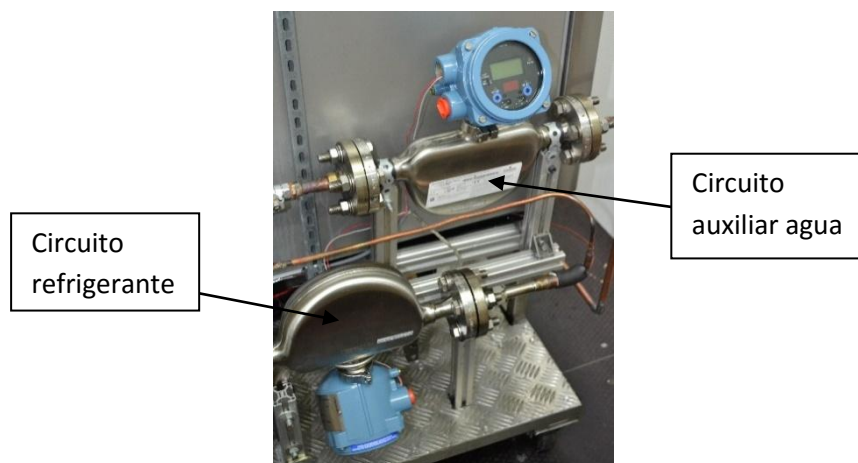


Figura 5.15 Colocación del caudalímetro según indicación del fabricante.

6. CONDICIONES DE ENSAYO

Los ensayos realizados para el estudio de este proyecto se realizan siguiendo unas condiciones determinadas. Para este proyecto todos los ensayos se desarrollan en modo estático al resultar más convenientes para la adquisición de los datos a analizar.

6.1. Descripción de ensayos

Ensayo estático. Con este ensayo se pretende lograr un funcionamiento del compresor estacionario evitando que realice arranques y paradas. Para conseguirlo, se instala una resistencia térmica en el interior de cada compartimento para mantener constante el balance de potencias caloríficas en el interior de la nevera, Figura 6.1.

$$\dot{Q}_{EV} = \dot{Q}_{FF} + \dot{Q}_{FZ} + \dot{Q}_{IN} \quad (6.1)$$

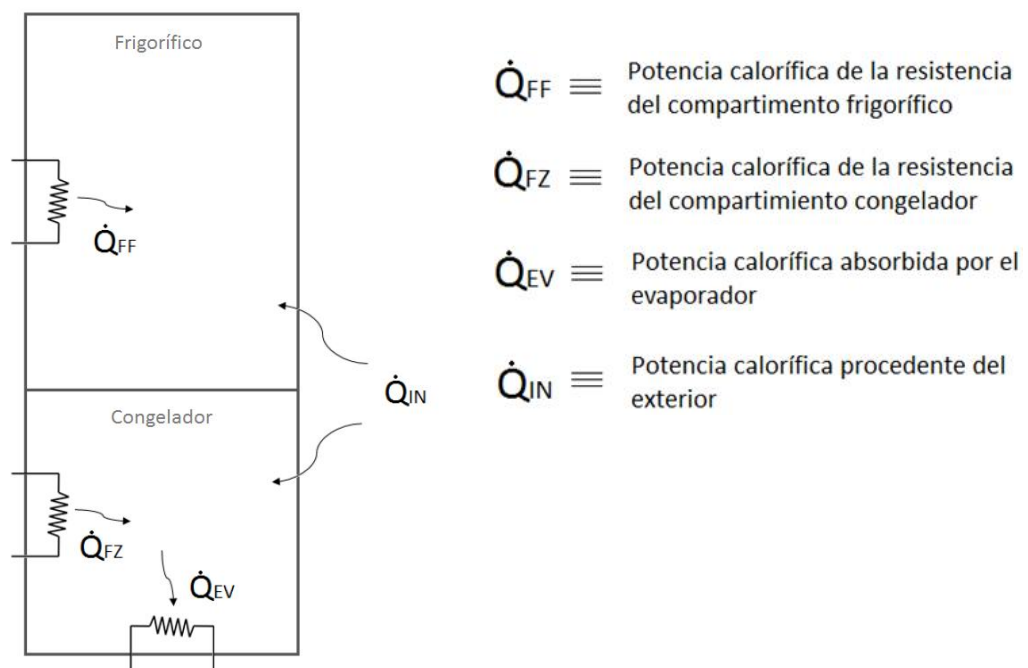


Figura 6.1 Balance de potencias caloríficas.

De este modo se consigue que el compresor nunca alcance las temperaturas idóneas para que se produzca la parada. Cuando la temperatura es próxima al valor de consigna, los PID's mandan una señal que controla la resistencia térmica oportuna, evitando que el compresor realice una parada. Así el compresor siempre funciona a la misma velocidad y son las resistencias las que son reguladas. Se muestra una representación aproximada de esta explicación en la Figura 6.2, situando la temperatura en el eje de coordenadas y el tiempo en el eje de abscisas.

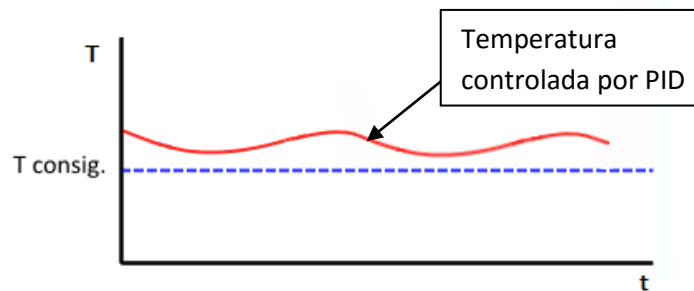


Figura 6.2 Modo de funcionamiento estático.

Ensayo dinámico. Este tipo de ensayos sí realiza arranques y paradas del compresor realizando un comportamiento cíclico, ya que se busca el funcionamiento normal del frigorífico. Para el estudio de este tipo de ensayos hay que tener en cuenta este funcionamiento cíclico.

6.2. Metodología de ensayo

Como se ha comentado, para este proyecto es más conveniente el ensayo en estático al facilitar la toma de datos necesaria. Por ello, todos los ensayos realizados se basan en el ensayo estático.

Para realizar este estudio los valores de referencia establecidos son:

Condiciones estacionarias de ensayos	
Velocidad giro compresor (rpm)	1600
Temperatura frigorífico (°C)	+4
Temperatura congelador (°C)	-20
Temperatura cámara climática (°C)	+25

Tabla 6.1 Condiciones estacionarias en ensayos.

- 1) El primer ensayo que se ha de realizar es la obtención de la carga óptima del circuito original con el condensador al ambiente. Para conocer el valor de carga óptima, se realiza un barrido de carga. Al alcanzar esta carga óptima, se conoce la condición de subenfriamiento y temperatura de condensación óptima, que son los datos que van a permitir comparar el condensador de aire con el de agua. Este ensayo se explica más detalladamente en el siguiente capítulo 7.

- 2) Una vez obtenida la carga óptima con aire, se ha de realizar ensayos con el condensador de agua. Ahora se busca alcanzar las mismas condiciones que con la carga óptima del circuito original. Para ello, se va a partir con la carga óptima del circuito de aire y con el caudal de agua calculado (1l/min) en la etapa de diseño. Como las condiciones habrán cambiado, se realiza una regulación de la carga, reduciéndola, hasta conseguir el mismo subenfriamiento y temperatura de condensación. Cuando se consigan las mismas condiciones que con el condensador de aire, se habrá alcanzado la carga óptima con el condensador de agua, ya que las condiciones establecidas son las condiciones de carga óptima del condensador de aire. Así tendremos las condiciones equivalentes al condensador de aire pero utilizando el circuito con el condensador refrigerante-agua.

- 3) Con el condensador de agua trabajando en las condiciones equivalentes al condensador original. Se va a analizar la entrada del tubo capilar cambiando la temperatura de condensación, esto se consigue regulando el caudal de agua que atraviesa el condensador equivalente. Con esta variación se pretende lograr el llenado del filtro de refrigerante en estado líquido, evitando así flujo bifásico a la entrada del tubo capilar. Si se consigue evitar que quede vapor en el filtro, se va a poder estudiar a partir del calor medido, si el problema es la longitud del condensador original o no.

7. CARACTERIZACIÓN DE UN PUNTO DE ENSAYO

Una vez mostrados todos los ensayos a realizar, se va a detallar el procedimiento a seguir para la obtención de la carga óptima.

Inicialmente se tiene que realizar la puesta en marcha de la instalación. En este punto el funcionamiento de la nevera es el habitual, por lo que el compresor trabaja en modo cíclico, es así para comprobar que el funcionamiento de todos los sistemas es correcto. El ensayo se puede comenzar cuando utilizando el modo estático, las temperaturas de los compartimentos están estables a su temperatura de referencia gracias al sistema de control por los PIDs.

El sistema utilizado para encontrar la carga óptima se basa en comparar el COP obtenido al utilizar cada carga. Como el COP está relacionado con la carga, cuando la carga varía también lo hace. Esta variación no es proporcional, por tanto, hay que realizar diferentes muestras para poder obtener el COP máximo que determine la carga óptima.

Se comienza con la carga de refrigerante que viene con el frigorífico original, siendo de 50 gramos. Para realizar el barrido de carga, es decir, ir modificación progresivamente la carga del circuito a medida que tomamos las medidas necesarias, se realiza un vertido de carga hasta un valor más elevado del original, en este caso se va a inyectar al circuito 20 gramos más. Así se van realizando ensayos desde los 70 hasta los 50 gramos bajando 5 gramos para cada ensayo. Se realiza así, al ser más fácil extraer 5 gramos que ir aumentándolo. Para la extracción, se hace el vacío a una botella y se conecta al lado de alta para que el refrigerante entre en la botella y sea pesado para conocer la carga que se ha extraído. Si se quiere inyectar el refrigerante, debe hacerse por el lado de baja y con el compresor en marcha, así la presión es menor a la atmosférica y absorbe el refrigerante, pero en la práctica es más costoso.

Cuando por el circuito circula el refrigerante y se alcanzan las condiciones estables, se puede obtener la potencia frigorífica (\dot{Q}_{frig}), mediante la instrumentación de la instalación, y las potencias eléctricas del compresor (\dot{W}_{Comp}) y las resistencias (\dot{W}_{Res}) que actúan. Así se puede obtener el valor de COP y comparándolos para cada carga, se obtiene el COP óptimo y con ello, la carga óptima.

$$\dot{Q}_{frig} = \dot{m}_{ref} \cdot (h_{out-evap} - h_{in-evap}) \quad (7.1)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{Res} + \dot{W}_{Comp} \quad (7.2)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{frig}}{\dot{W}} \quad (7.3)$$

8. ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se va a realizar la valoración económica que ha repercutido la realización del presente Trabajo Final de grado.

No se han considerado las instalaciones existentes como la cámara climática o el frigorífico-congelador con el primer banco de pruebas.

Inicialmente se ha realizado el estudio, planteamiento y diseño del banco de pruebas a realizar, esto ha conllevado un gasto económico debido a las horas del ingeniero dedicado a ello.

Tras la realización del diseño del banco de pruebas, se ha llevado a cabo su construcción. Para completar dicho objetivo se ha precisado de materiales y mano de obra específica para cada etapa.

El coste final asociado al trabajo realizado durante todo el Trabajo Final de Grado se valora en DIECINUEVE MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y TRES CON OCHENTA Y TRES CÉNTIMOS DE EURO.

Para un mayor justificación y precisión se ha realizado el documento nº2 del presente trabajo, donde se detalla el presupuesto en capítulos y a su vez, subdivididos en las unidades de obra con los precios descompuestos, que hacen referencia a dichos capítulos.

9. CONCLUSIONES

A lo largo del presente Trabajo Final de Grado, que surge a partir de la tesis doctoral de Laetitia Bardoulet realizada en el IIE, se ha desarrollado el diseño y construcción de la instalación experimental para el análisis del flujo a la entrada del tubo capilar.

En el capítulo de diseño, se ha mostrado la necesidad de realizar una remodelación en el circuito frigorífico; el proyecto íntegro del circuito auxiliar y el planteamiento de un condensador que sea capaz de evacuar la misma potencia calorífica que el condensador original, pero utilizando agua como fluido de intercambio.

En el capítulo de construcción, se ha realizado el seguimiento y el montaje paso a paso de todas las partes que componen el segundo banco de pruebas. Al tratarse de un Trabajo Final de Grado en una instalación real, se ha podido mostrar todos los procesos ejecutados para obtener el montaje final.

Los objetivos propuestos en el trabajo han sido alcanzados y completados, el banco de pruebas se ha construido siguiendo el plan previsto. Para proseguir con el orden cronológico establecido, se ha de realizar la puesta en marcha de la instalación y la posterior realización de los ensayos explicados.

Tras haber estado participando en el diseño y construcción de la instalación experimental, se pueden realizar algunas recomendaciones referentes a la parte de montaje.

- En cuanto a la realización de las tareas, es importante definir inicialmente de manera detallada y precisa el conjunto de actividades que han de llevarse a cabo durante el proyecto. Así actividades que a priori no tienen que realizarse con demasiada prioridad, pueden ser adelantadas paralelamente a otras que sí la tiene, para lograr una reducción de la extensión temporal de la instalación. Como, por ejemplo, durante la remodelación del circuito original, se ha llevado a cabo el ensamblaje y comprobación de los distintos termopares que han sido utilizados en el banco de pruebas, así este proceso que es dilatado en el tiempo, se ha verificado en espacios temporales parcialmente ocupados.
- Al tratarse de una instalación real, siempre hay que tener en cuenta posibles imprevistos. Como en cualquier proyecto, durante la realización del TFG han surgido algunos como, por ejemplo, la necesidad de adquirir un caudalímetro específico por el reducido caudal en el circuito de refrigerante. Este hecho ha conllevado su espera durante dos meses, pero no ha supuesto problemas debido a que su colocación estaba prevista posteriormente. Este caso, podría haber supuesto una prolongación del proyecto. Por ello, en el caso de elementos materiales hay que realizar, como se ha llevado a cabo en este proyecto, un inventario inicial para poder adquirir todo lo necesario.

10. REFERENCIAS

1. Compañ Moreno, V. et al. (2011). *Termodinámica aplicada*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
2. Aiguasol. Refrigeración Solar. <<http://aiguasol.coop/2010/12/11/refrigeracion-solar/>> [Consulta: 10 de febrero de 2016]
3. *El tubo capilar*. Elaboración propia a partir de <http://www.ahorra-energia-aireacondicionado.com/capilar.html> [Consulta: 2 de marzo de 2016]
4. Apuntes de Máquinas térmicas, GITI. Universitat Politècnica de Valencia. 2014-2015.
5. Inan, C., Gonul, T., Tanes, M.Y., (2003). X-ray investigation of a domestic refrigerator. Observations at 25°C ambient temperature, *International Journal of Refrigeration*, 26: 205-213
6. Boeng, J., & Melo, C., (2014). Mapping the energy consumption of household refrigerators by varying the refrigerant charge and the expansion restriction, *International Journal of Refrigeration*, 41: 37-44
7. Boeng, J., Melo, C., (2012). A Capillary Tube - Refrigerant Charge Design Methodology for Household Refrigerators - Part II: Equivalent Diameter and Test Procedure, Refrigeration and A/C Equipment, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, IN, USA*
8. Torrella Alcaraz, E. (1996). *La producción de frío*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
9. Hernández Goribar, E. (1997). *Fundamentos de Aire acondicionado y Refrigeración*. Editorial Limusa.
10. Incropera, Frank., Dewitt, David. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Editorial Prentice Hall Hispanoamericana.
11. Instituto tecnológico de Mexicali <<http://es.slideshare.net/alexandrogr/métodos-de-diseo-basicos-para-intercambiadores-de-calor>> [Consulta: 15 de abril de 2016]
12. Industrial Ibaiondo, S.A. *Catálogo de producto*. <http://www.ibaiondo.es/descargas/catalogo_IBAIONDO.pdf> [Consulta: 2 de mayo de 2016]
13. Hernández Riesco, G. (2014). *Manual del soldador*. Editorial: Cesol.
14. Arian Control & Instrumentación. Pt100, su operación, instalación y tablas. <<http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>> [Consulta: 2 de mayo de 2016]
15. Russo D. *Estudio para la construcción de un banco de ensayos en frigorífico de alta eficiencia*. (2014) Universitat Politècnica de Valencia.
16. Emerson. Manual ATEX Installation Instructions. <<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Micro%20Motion%20Documents/CMFS-ATEX-Install-Manual-MMI-20015054.pdf>>. [Consulta: 8 de mayo de 2016]
17. Emerson. PT5 Pressure Transmitters Technical Data. <<http://www.emersonclimate.com/Documents/FlowControls/pdf/electronicxvalves/PT5.pdf>>. [Consulta: 8 de mayo de 2016]
18. AENOR (2004). *Climatización. Diseño y cálculo de sistemas de expansión*. UNE 100155:2004. Madrid AENOR
19. AENOR (2014). *Aparatos de refrigeración domésticos. Características y métodos de ensayo*. UNE-EN 62552:2014. Madrid AENOR

DOCUMENTO N° 2

Presupuesto





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	2
3. PRESUPUESTO BASE LICITACIÓN	5

1. INTRODUCCIÓN

El documento que se presenta a continuación, pretende presupuestar el diseño y construcción del banco utilizado para el análisis de la entrada al tubo capilar de un sistema frigorífico-congelador para estudiar la existencia de flujo bifásico.

Se ha detallado por capítulos que forman parte del presupuesto global, exponiendo en unidades de obra los costes parciales de las distintas etapas que ha compuesto el presente Trabajo Final de Grado. Por ello, se desglosa en capítulos de: planteamiento y diseño de la instalación; modificaciones realizadas sobre el circuito de refrigerante existente, creación del circuito auxiliar de agua y la construcción asociada al intercambiador equivalente mediante tubos gemelos; equipos de adquisición de datos, instrumentación y sistema de maniobra y seguridad.

En el presupuesto no se ha incluido el precio de las instalaciones precedentes o de las que se ha partido, como es la cámara climática utilizada y el frigorífico doméstico utilizado para el primer banco de pruebas, al tratar de presupuestar las modificaciones realizadas. Tampoco se ha tenido en cuenta la utilización de software como Inventor 2014 o Solidworks 2015, ya que la Universidad Politécnica de Valencia tiene la licencia de forma gratuita y, además, se han utilizado meramente para mostrar dos representaciones de forma más clara.

Los equipos utilizados no son exclusivos para este trabajo. Por ello, su rendimiento se ha calculado a partir de las horas de uso, estimación de la vida útil y coste del dispositivo en cuestión.

Para cada unidad de obra, se ha añadido un porcentaje específico de costes directos complementarios, este coste hace referencia principalmente a los pequeños componentes materiales utilizados como tornillería, herramientas mecánicas utilizadas y su deterioro, que es difícil de cuantificar.

No se ha tenido en cuenta para la realización de este presupuesto la adición del porcentaje equivalente a los costes indirectos. Ya que, al ser un presupuesto moderado, no tiene relevancia ese pequeño porcentaje y no va a influir de manera apreciable en el precio final.

Todos los precios están contabilizados en euros y, por tanto, los costes también se muestran en esa unidad monetaria.

2. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

A continuación, se van a presentar cuadros de precios descompuestos de los procesos realizados, divididos en cuatro capítulos. Como se ha comentado, los precios que se muestran en este presupuesto están indicados en euros.

Capítulo 1: Planteamiento, documentación y diseño de la instalación.

Nº orden	Uds.	Descripción Unidad de obra	Rto.	Precio	Importe
1.1		Búsqueda de normativa y bibliografía aplicable al proyecto			
		Estudio de la situación del proyecto, para conocer la normativa vigente a aplicar y búsqueda de referencias relacionadas.			
1.1.1	h	Ingeniero de proyectos	5,00	40,00	200,00
1.1.2	%	Costes directos complementarios	0,01	200,00	2,00
				Coste total	202,00
1.2		Planteamiento y diseño de la instalación			
		Diseño y selección de los elementos necesarios para la realización del segundo banco de pruebas.			
1.2.1	h	Ingeniero de proyectos	70,00	40,00	2.800,00
1.2.2	%	Costes directos complementarios	0,01	2.800,00	28,00
				Coste total	2.828,00

Figura 2.1 Cuadro de precios descompuesto de Planteamiento y diseño de la instalación.

Capítulo 2: Equipos y sistemas utilizados para la adquisición de datos.

Nº orden	Uds.	Descripción Unidad de obra	Rto.	Precio	Importe
2.1		Sistemas de control y adquisición de datos			
		Colocación y configuración de los distintos dispositivos utilizados para el control y adquisición de los datos de la instalación.			
2.1.1	h	Ingeniero de automática y control	2,00	40,00	80,00
2.1.2	h	Oficial 1ª Frigorista	6,00	20,00	120,00
2.1.3	uds	Ordenador personal i3 4GB RAM	0,06	649,00	38,94
2.1.4	uds	Data logger Agilent 34970A	0,06	1.281,00	76,86
2.1.5	uds	Multiplexor HP 34901A	0,06	386,00	23,16
2.1.6	uds	PID Watlow EZ-ZONE modelo PM6C1FJ-AAAAAAA	2,00	264,50	529,00
2.1.7	%	Costes directos complementarios	0,01	867,96	8,68
				Coste total	876,64

Figura 2.2 Cuadro de precios descompuesto de los sistemas utilizados para la adquisición de datos.

Capítulo 3: Construcción y montaje del segundo banco de pruebas

Nº orden	Uds.	Descripción Unidad de obra	Rto.	Precio	Importe
3.1		Remodelación circuito refrigerante			
		Sustitución de los elementos existentes en el primer banco de pruebas, construcción y montaje de los nuevos tramos y elementos.			
3.1.1	h	Ingeniero especialista en refrigeración	10,00	40,00	400,00
3.1.2	h	Oficial 1ª Frigorista	30,00	20,00	600,00
3.1.3	uds	Botella refrigerante R-600a 420gr.	1,00	20,00	20,00
3.1.4	uds	Báscula digital portátil para medición de carga	0,10	61,25	6,13
3.1.5	uds	Filtro antihumedad de zeolita	2,00	18,00	36,00
3.1.6	m	Tubo capilar 0,6mm	4,00	3,51	14,04
3.1.7	m	Tubo capilar 0,3mm	4,00	4,48	17,92
3.1.8	m	Tubo termoplástico PFA	3,00	11,90	35,70
3.1.9	m	Tubería de cobre rígido 3/4"	3,00	3,34	10,02
3.1.10	uds	Válvula de bola 3/4"	8,00	8,80	70,40
3.1.11	uds	Racor cobre 3/4"	8,00	0,88	7,04
3.1.12	uds	Codo cobre 90º 3/4"	6,00	1,02	6,12
3.1.13	uds	Curva cobre 3/4"	2,00	3,12	6,24
3.1.14	uds	Equipo para soldadura	0,10	325,00	32,50
3.1.15	uds	Varilla soldadura Cu/Ag 5%	5,00	0,92	4,60
3.1.16	uds	Bomba de vacío de doble efecto. Potencia 0.37Kw.	0,20	432,00	86,40
3.1.17	%	Costes directos complementarios	0,05	1.353,11	67,66
				Coste total	1.420,76
3.2		Construcción circuito auxiliar de agua			
		Realización y montaje del circuito completo de agua utilizado para la medición exacta del título de vapor a la entrada del capilar.			
3.2.1	h	Ingeniero especialista en refrigeración	15,00	40,00	600,00
3.2.2	h	Oficial 1ª Frigorista	40,00	20,00	800,00
3.2.3	uds	Bomba Flojet, modelo D3131H5011AR	1,00	141,65	141,65
3.2.4	uds	Tanque expansión Ibaiondo modelo miniflex 16 bar V-160	0,40	31,85	12,74
3.2.5	uds	Aerotermino de 100W	0,40	110,25	44,10
3.2.6	uds	Purgador automático GENE BRE	1,00	8,19	8,19
3.2.7	uds	Válvula de bola 12mm	10,00	5,31	53,10
3.2.8	uds	Válvula reguladora 12mm	2,00	19,60	39,20
3.2.9	m	Tubería de cobre rígido 12mmxm	7,00	2,02	14,14
3.2.10	m	Aislante Armaflex 50x3mm	5,00	3,23	16,15
3.2.11	uds	Equipo para soldadura	0,15	325,00	48,75
3.2.12	uds	Varilla soldadura Cu/Ag 5%	5,00	0,92	4,60
3.2.13	uds	Racor cobre 12mm	8,00	0,93	7,44
3.2.14	uds	Codo cobre 90º 12mm	5,00	0,81	4,05
3.2.15	uds	Curva cobre 12mm	4,00	2,97	11,88
3.2.16	uds	Ventilador modelo 4715MS-23T-B50	2,00	10,95	21,90
3.2.17	uds	Plancha Alumisol 1,44m2 de 50mm	1,00	10,22	10,22
3.2.18	%	Costes directos complementarios	0,05	1.838,11	91,91
				Coste total	1.930,02

3.3	Intercambiador tubos gemelos				
	Construcción del intercambiador mediante tubos gemelos con flujo contracorriente. Incluye el montaje y el aislamiento térmico.				
3.3.1	h	Ingeniero especialista en refrigeración	10,00	40,00	400,00
3.3.2	h	Oficial 1ª Frigorista	20,00	20,00	400,00
3.3.3	m	Tubería de cobre rígido 3/16"	10,00	3,34	33,40
3.3.4	m	Aislante Armaflex tubo 20mm	10,00	6,25	62,50
3.3.5	uds	Equipo para soldadura	0,30	325,00	97,50
3.3.6	uds	Varilla soldadura Cu/Ag 5%	9,00	0,92	8,28
3.3.7	%	Costes directos complementarios	0,01	1.001,68	10,02
				Coste total	1.011,70
3.4	Instrumentación instalación experimental.				
	Colocación de toda la instrumentación necesaria para la instalación experimental. Incluye fabricación de termopares y su comprobación.				
3.4.1	h	Ingeniero especialista en refrigeración.	15,00	40,00	600,00
3.4.2	h	Oficial 1ª Frigorista.	20,00	20,00	400,00
3.4.3	uds	Termoresistencia Pt100 de 4 hilos.	0,30	100,00	30,00
3.4.4	uds	Cable termopares tipo T. (400m)	0,40	460,00	184,00
3.4.5	uds	Resistencias calefactoras 200W.	0,30	17,20	5,16
3.4.6	uds	Transductor de presión Emerson PT5-07M.	0,30	81,09	24,33
3.4.7	uds	Transductor de presión Setra C280E 100psi.	0,30	586,59	175,98
3.4.8	uds	Manómetro Presión de agua 0-6bar. CL. 1.6.	0,30	11,22	3,37
3.4.9	uds	Manómetro Presión de agua 0-6bar. CL. 2.5.	0,30	15,34	4,60
3.4.10	uds	Caudalímetro Emerson CMFS015.	0,30	5.017,46	1.505,24
3.4.11	uds	Caudalímetro Emerson CMFS010.	0,30	5.215,50	1.564,65
3.4.12	uds	Equipo para comprobación de termopares.	0,20	1.200,00	240,00
3.4.13	uds	Perfil aluminio Rexroth 3m 3x3cm	1,00	38,17	38,17
3.4.14	uds	Tuerca en T para perfil Rexroth. Bolsa de 10	2,00	9,37	18,74
3.4.15	%	Costes directos complementarios	0,03	4.794,23	143,83
				Coste total	4.938,06

Figura 2.3 Cuadro de precios descompuestos de la construcción y montaje del segundo banco de pruebas.

Capítulo 4: Diseño del cuadro de maniobra y seguridad.

Nº orden	Uds.	Descripción Unidad de obra	Rto.	Precio	Importe
4.1	Cuadro de maniobra y seguridad				
	Diseño del cuadro de maniobra y seguridad, incluyendo su configuración y colocación.				
4.1.1	h	Ingeniero especialista en electricidad	2,00	40,00	80,00
4.1.2	h	Oficial 1ª Electricista	7,00	20,00	140,00
4.1.3	uds	Relé de 4 contactos libres 220V	2,00	8,70	17,40
4.1.4	uds	Termostato 0-100°C	1,00	17,49	17,49
4.1.5	uds	Presostato 0-6 bar	1,00	20,57	20,57
4.1.6	uds	Magnetotérmico 2 polos, In=6A	1,00	21,13	21,13
4.1.7	uds	Diferencial 2 polos, 30mA	1,00	22,90	22,90
4.1.8	uds	Fuente alimentación 12V	1,00	45,70	45,70
4.1.9	%	Costes directos complementarios	0,01	365,19	3,65
				Coste total	368,84

Figura 2.4 Cuadro de precios descompuestos del cuadro de maniobra y seguridad.

A continuación, se expone el importe de cada unidad de obra y se realiza un presupuesto con los cuatro presupuestos parciales que corresponden a los capítulos presentes en el trabajo, teniendo en cuenta que la medición para cada capítulo es la unidad:

Nº orden	Unidades de Obra	Importe
1.1	Búsqueda de normativa y bibliografía aplicable al proyecto	202,00
1.2	Planteamiento y diseño de la instalación	2.828,00
Total capítulo 1		3.030,00
2.1	Sistema de control y adquisición de datos	876,64
Total capítulo 2		876,64
3.1	Remodelación circuito refrigerante	1.420,76
3.2	Construcción circuito auxiliar agua	1.930,02
3.3	Intercambiador tubos gemelos	1.011,70
3.4	Instrumentación instalación experimental	4.938,06
Total capítulo 3		9.300,53
4.1	Cuadro de maniobra y seguridad	368,84
Total capítulo 4		368,84
TOTAL		13.576,01

Figura 2.5 Resumen de importe por unidades de obra.

3. PRESUPUESTO BASE LICITACIÓN

En este apartado, se detalla el presupuesto total. Partiendo del presupuesto total de ejecución material, donde se aplica un 12% de gastos generales, posteriormente un 6% de beneficio industrial para obtener el presupuesto por contrata. Al presupuesto por contrata le falta aplicarle los impuestos correspondientes (I.V.A.).

Descripción	Importe
Presupuesto de Ejecución Material	13.576,01
Gatos Generales 12%	1.629,12
Beneficio Industrial 6%	814,56
Presupuesto de Ejecución por Contrata	16.019,69
I.V.A. 21%	3364,14
Presupuesto base de licitación	19.383,83

Figura 2.6 Presupuesto final aplicado al TFG.

De este modo, asciende el presente presupuesto a la expresada cantidad de: DIECINUEVE MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y TRES CON OCHENTA Y TRES CÉNTIMOS DE EURO.