



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un banco de ensayos para el estudio de
intercambiadores de calor en refrigeración líquida de dispositivos
electrónicos.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Jiménez Martínez-Darve

DIRECTORES: Jose Ignacio Iglesias Prado

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un banco de ensayos para el estudio de
intercambiadores de calor en refrigeración líquida de dispositivos
electrónicos.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño de un banco de ensayos destinado al estudio del comportamiento térmico e hidráulico de intercambiadores de calor en sistemas de refrigeración líquida. El desarrollo del trabajo parte de la necesidad de disponer de una herramienta experimental que permita obtener datos reales que complementen el conocimiento teórico existente en este ámbito, especialmente en aplicaciones relacionadas con la refrigeración de sistemas electrónicos.

A lo largo del proyecto se ha llevado a cabo el diseño conceptual y detallado del sistema, incluyendo la definición del circuito hidráulico, la selección de componentes y el modelado tridimensional mediante herramientas de diseño asistido por ordenador. Asimismo, se ha diseñado una estructura de soporte que permite la integración de todos los elementos en un sistema compacto, funcional y de fácil manipulación. El banco de ensayos propuesto permite la utilización de distintos fluidos de trabajo, la sustitución de intercambiadores de calor y la monitorización de variables clave como el caudal y la presión, lo que lo convierte en una herramienta versátil para la realización de ensayos experimentales bajo distintas condiciones de operación.

Finalmente, se ha realizado una validación conceptual del diseño y una estimación económica del sistema, sentando las bases para su futura construcción, implementación y uso en estudios experimentales.

PALABRAS CLAVE

Refrigeración líquida, Intercambiadores de calor, Banco de ensayos, Microcanales, Nanofluidos, Circuito hidráulico, Modular.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor D. Jose Ignacio Iglesias Prado, que se ha involucrado en el desarrollo de este trabajo, aportando conocimientos y ofreciendo soluciones que han resultado determinantes para el resultado del mismo. Por la confianza y el buen trato recibido en todo momento.

A la Escuela Naval Militar y a todo su personal, especialmente a todos aquellos que de una manera u otra han influido en mi formación y han hecho de esta mi casa estos últimos 5 años.

A la promoción 426-156, mi brigada, que son lo más valioso que me ha dado la Armada. Por todo lo vivido, lo bueno, lo menos bueno y lo que está por llegar.

A mis “chavules”, pilar fundamental en el que apoyarse cuando faltan fuerzas, a todos y cada uno de ellos, en especial al que nos mira desde el cielo, gracias Gonzalo.

A mi familia, lo más grande que tengo y sin la que nada de esto hubiera sido posible.

A todos ellos, muchas gracias.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Introducción	5
1.2 Objetivos	5
2 Estado del arte	7
2.1 Refrigeración líquida en electrónica	8
2.2 Intercambiadores de calor	8
2.2.1 Según los procesos de transferencia	9
2.2.2 Según el tipo de construcción	10
2.3 Intercambiadores de microcanales	11
2.3.1 Geometría interna de los intercambiadores	11
2.4 Panorama actual de la investigación y necesidad de experimentación	14
3 Desarrollo del TFG.....	15
3.1 Concepto y funcionamiento del banco.....	15
3.2 Criterios de diseño	17
3.3 Descripción general del banco diseñado	18
3.4 Selección de componentes	19
- Intercambiador de calor	19
- Disipador.....	20
- Caudalímetro.....	22
- Bomba del banco.....	23
- Bomba de recirculación	24
- Tanque.....	26
- Sensor de presión	26
- Sensor de presión diferencial	27
- Purgador	28
- Válvulas, racores y otros elementos de unión.....	29
3.5 Diseño CAD del banco	31
3.5.1 Soporte del banco	32
4 Resultados / Validación / Prueba.....	35
4.1 Validación conceptual del banco de ensayos	35

4.2 Validación modular del banco de ensayos	36
4.2.1 Funcionamiento esperado	36
4.2.2 Manipulación del banco.....	36
4.2.3 Utilidad para ensayos.....	40
4.3 Costes de fabricación y montaje del proyecto	40
4.3.1 Coste de componentes instrumentales	41
4.3.2 Coste de piezas y conductos	41
4.3.1 Presupuesto total estimado	43
5 Conclusiones y líneas futuras	45
5.1 Conclusión	45
5.2 Limitaciones.....	46
5.3 Líneas futuras	47
6 Bibliografía.....	49
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	52
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	53
Anexo III: Declaración de uso de Inteligencia Artificial	54
Anexo IV: Planos	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Tipos de convección [1]	7
Figura 2-2 Refrigeración líquida [2].....	8
Figura 2-3 Formas de transferencia de calor [6].	9
Figura 2-4 Intercambiador de carcasa y tubo [9].....	10
Figura 2-5 Intercambiador de tipo serpentín [10].....	11
Figura 2-6 Intercambiadores de microcanales según geometría interna (Imagen generada con IA)	13
Figura 3-1 Esquema funcional del circuito	16
Figura 3-2 Dibujo simplificado del banco.....	16
Figura 3-3 Circuito de recirculación (Diseño CAD)	18
Figura 3-4 Sensor diferencial depresión con purgador automático (Diseño CAD)	19
Figura 3-5 Intercambiador modelo (CAD).....	20
Figura 3-6 Corsair Hydro X Series XR5 Neo [19] y diseño CAD.....	21
Figura 3-7 Ventiladores axiales de 120 mm [20] y diseño CAD	21
Figura 3-8 Ensamblaje del disipador diseño CAD.....	22
Figura 3-9 Medidas del caudalímetro utilizado y diseño CAD [21]	23
Figura 3-10 Bomba centrífuga EHEIM Universal 300 [22] y diseño CAD.....	24
Figura 3-11 Bomba de recirculación y modelo CAD.....	25
Figura 3-12 Sensor de presión SITRANS 210 [25] y modelo CAD	26
Figura 3-13 Sensor de presión diferencial SITRANS P320 [14] y modelo CAD.....	28
Figura 3-14 Purgador automático de canalización [16] y modelo CAD	28
Figura 3-15 Secciones de tubería de cobre y manguera flexible (CAD).....	29
Figura 3-16 Geometría de los manguitos utilizados (CAD).....	30
Figura 3-17 Válvula utilizada en el banco modelo CAD	31
Figura 3-18 Ilustración del banco de ensayos (CAD)	32
Figura 3-19 Estructura de soporte para el banco de ensayos (CAD)	33
Figura 3-20 Ensamblaje completo del banco y el soporte.....	33
Figura 4-1 Configuración para presurización del banco	37
Figura 4-2 Configuración para despresurización del banco	38
Figura 4-3 Configuración para el purgado	39
Figura 4-4 Esquema funcional del circuito	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Principales parámetros del banco.....	17
Tabla 3-2 Principales parámetros de la bomba.....	24
Tabla 3-3 Principales parámetros de la bomba [24].....	25
Tabla 4-1 Resultado de precios de los instrumentos del banco.....	41
Tabla 4-2 Resultado de precios de los componentes hidráulicos del banco.....	42
Tabla 4-3 Resultado de precios de componentes del soporte.....	42
Tabla 4-4 Presupuesto final estimado.....	43

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El avance continuo de la tecnología ha dado lugar a dispositivos electrónicos cada vez más potentes y compactos, lo que ha incrementado significativamente las densidades de potencia que deben ser gestionadas durante su funcionamiento. Como consecuencia, la gestión térmica se ha convertido en un factor clave para garantizar la fiabilidad, eficiencia y vida útil de los sistemas electrónicos modernos.

Entre las distintas soluciones existentes para la disipación de calor, los sistemas de refrigeración líquida han adquirido una importancia creciente en aplicaciones donde los métodos tradicionales de refrigeración por aire resultan insuficientes. Gracias a sus propiedades termofísicas, los fluidos refrigerantes permiten evacuar mayores flujos de calor y mantener condiciones de funcionamiento más estables en los dispositivos electrónicos.

El estudio de los intercambiadores de calor, elementos fundamentales en los sistemas de refrigeración líquida, ha sido ampliamente abordado desde el punto de vista teórico y numérico. En la literatura científica existen numerosos modelos y correlaciones que describen el comportamiento térmico e hidráulico de estos dispositivos, así como métodos de optimización para mejorar su rendimiento. Sin embargo, la disponibilidad de datos experimentales sigue siendo limitada en muchos casos, especialmente cuando se pretende comparar diferentes configuraciones de intercambiadores o analizar la influencia de distintos fluidos de trabajo bajo condiciones controladas.

Ante esta situación, surge la necesidad de disponer de infraestructuras experimentales que permitan obtener datos fiables que complementen el conocimiento teórico existente. En este contexto se plantea el presente Trabajo de Fin de Grado, cuyo objetivo es el diseño de un banco de ensayos destinado al estudio del comportamiento térmico e hidráulico de sistemas de refrigeración líquida. Este banco permitirá analizar el rendimiento de distintos intercambiadores de calor y evaluar el efecto de diferentes fluidos de trabajo, contribuyendo a la obtención de nuevos datos experimentales en este campo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es el diseño de un banco de ensayos destinado al estudio y evaluación de intercambiadores de calor utilizados en sistemas de refrigeración líquida debido a la gran falta de datos experimentales en este campo a pesar del amplio conocimiento que se tiene del mismo a nivel teórico. Este banco de ensayos permitirá analizar el comportamiento térmico e

hidráulico de distintos intercambiadores mediante la circulación controlada de un fluido de trabajo y la medición de diferentes variables del sistema.

Durante el proceso de diseño se ha tenido en cuenta la necesidad de que el banco de ensayos ocupe un espacio reducido, de modo que pueda instalarse fácilmente en un entorno de laboratorio sin resultar excesivamente voluminoso o aparatoso. Aunque no se ha establecido una limitación dimensional estricta, el diseño se ha planteado buscando una configuración compacta, funcional y fácilmente accesible, que facilite tanto el montaje de los diferentes componentes como la realización de los ensayos experimentales.

Además del objetivo principal relacionado con el diseño del banco de ensayos, el presente trabajo plantea una serie de objetivos secundarios de carácter técnico que contribuyen al desarrollo completo del sistema.

Entre estos objetivos se encuentra la definición y modelado tridimensional del banco de ensayos mediante herramientas de diseño asistido por ordenador, con el fin de integrar de forma coherente los distintos componentes del sistema y garantizar su compatibilidad geométrica y funcional.

Asimismo, se plantea el desarrollo de un diseño conceptual del circuito hidráulico que permita establecer la disposición de los diferentes elementos, definir el recorrido del fluido y asegurar un funcionamiento adecuado del sistema en condiciones de operación representativas.

Otro de los objetivos es la selección de los componentes que formarán parte del banco de ensayos, teniendo en cuenta criterios técnicos como el rango de funcionamiento, la compatibilidad entre elementos y su adecuación a los requisitos del sistema.

Finalmente, se plantea el diseño de una solución experimental modular que permita la sustitución de intercambiadores de calor y la utilización de distintos fluidos de trabajo, así como la incorporación de sistemas de instrumentación para la monitorización de variables relevantes durante los ensayos.

2 ESTADO DEL ARTE

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha estado marcado por una progresiva miniaturización de los dispositivos electrónicos y un aumento constante de su capacidad de procesamiento. Este avance ha permitido mejorar el rendimiento de sistemas electrónicos en numerosos ámbitos, desde la electrónica de consumo hasta aplicaciones industriales, aeroespaciales y de defensa. Sin embargo, este incremento en la densidad de potencia ha traído consigo un problema crítico: la gestión térmica de los componentes electrónicos.

El calor generado durante el funcionamiento de dispositivos como microprocesadores, circuitos integrados o módulos de potencia debe ser disipado de forma eficiente para evitar sobrecalentamientos que comprometan su rendimiento, fiabilidad y vida útil. Una disipación térmica inadecuada puede provocar fallos, pérdidas de eficiencia y, en casos extremos, la destrucción del componente.

Tradicionalmente, la refrigeración de dispositivos electrónicos se ha basado en sistemas de convección natural o convección forzada por aire [1]. No obstante, estos métodos presentan limitaciones importantes cuando se enfrentan a elevadas densidades de flujo térmico. Como consecuencia, en los últimos años se ha incrementado el interés por sistemas de refrigeración más avanzados, entre los que destaca la refrigeración líquida.

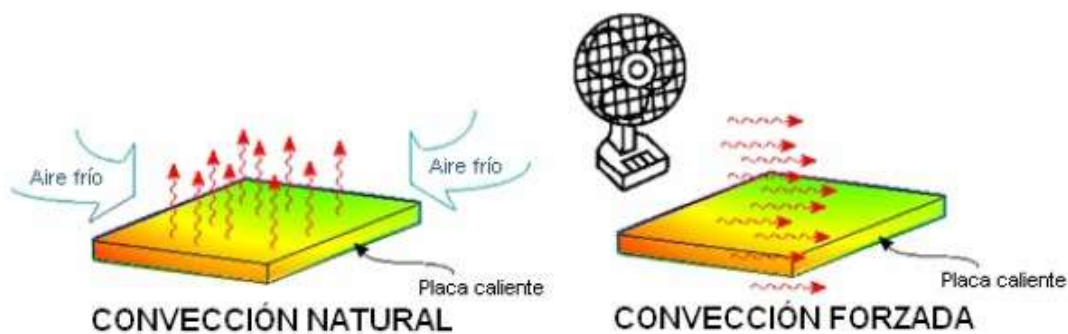


Figura 2-1 Tipos de convección [1]

En este contexto, la investigación se ha centrado tanto en el desarrollo de nuevos intercambiadores de calor de alta eficiencia como en la creación de bancos de ensayos experimentales que permitan evaluar su comportamiento térmico e hidráulico bajo condiciones controladas. El presente estado del arte revisa los principales avances en estos ámbitos, prestando especial atención a la refrigeración líquida aplicada a la electrónica, el uso de intercambiadores de microcanales y la importancia de los bancos de ensayos.

2.1 Refrigeración líquida en electrónica

La refrigeración líquida se ha consolidado como una de las soluciones más eficaces para la disipación de calor en dispositivos electrónicos de media y alta densidad de potencia. A diferencia de la refrigeración por aire, los líquidos refrigerantes presentan una mayor capacidad calorífica y mejores coeficientes de transferencia de calor, lo que permite evacuar mayores flujos térmicos con menores gradientes de temperatura.

Este tipo de refrigeración se basa generalmente en la circulación forzada de un fluido a través de un circuito cerrado, en el que el calor generado por el dispositivo electrónico se transfiere al refrigerante mediante convección. Posteriormente, el fluido transporta el calor hasta un intercambiador, donde es disipado al ambiente o a otro sistema auxiliar.

Entre las principales ventajas de la refrigeración líquida se encuentran su elevada eficiencia térmica, la posibilidad de trabajar en un amplio rango de temperaturas y su capacidad para mantener condiciones de operación más uniformes en el dispositivo refrigerado. Estas características hacen que sea especialmente adecuada para aplicaciones como centros de datos, electrónica de potencia, sistemas embarcados y microprocesadores de alto rendimiento.

No obstante, la refrigeración líquida también presenta desafíos relevantes. La complejidad del sistema, el riesgo de fugas, la necesidad de componentes adicionales como bombas e intercambiadores de calor, y el coste asociado a su implementación son factores que deben ser cuidadosamente considerados durante el diseño. Asimismo, la selección del fluido refrigerante juega un papel fundamental, ya que sus propiedades termofísicas influyen directamente en el rendimiento del sistema.

Debido a estos factores, el diseño y análisis de sistemas de refrigeración líquida requiere un enfoque experimental que permita evaluar su comportamiento real bajo distintas condiciones de funcionamiento, complementando los estudios teóricos y numéricos.

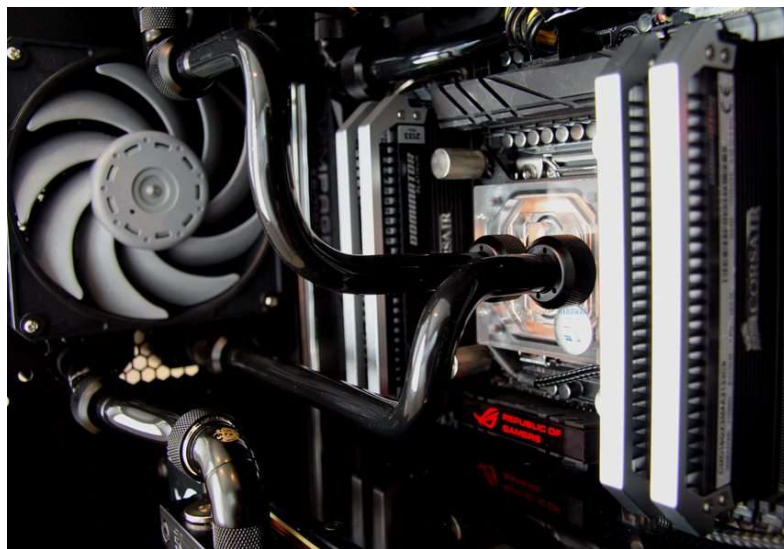


Figura 2-2 Refrigeración líquida [2]

2.2 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos cuya función principal es transferir energía térmica entre dos o más fluidos, o entre un fluido y una superficie sólida, generalmente sin que exista contacto directo entre los fluidos implicados. Estos equipos son ampliamente utilizados en numerosos sectores industriales, como la generación de energía, la industria química, los sistemas de refrigeración y las

instalaciones de climatización. Su uso permite aprovechar de manera más eficiente la energía térmica disponible, contribuyendo a mejorar el rendimiento energético de los sistemas en los que se emplean [3].

La transferencia de calor en los intercambiadores puede producirse mediante tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación.

En primer lugar, la conducción tiene lugar cuando dos cuerpos con diferentes temperaturas entran en contacto, permitiendo que la energía térmica fluya desde el de más temperatura al de menos temperatura [4]. En el ámbito industrial, este mecanismo está presente en dispositivos como enfriadores de procesos, hornos y unidades de refrigeración.

La convección consiste en la transferencia de calor asociada al movimiento de un fluido. Puede distinguirse entre convección natural, que ocurre cuando el movimiento del fluido se genera debido a variaciones de densidad provocadas por diferencias de temperatura, y convección forzada, cuando dicho movimiento es producido por dispositivos externos como bombas o ventiladores [5]. Este mecanismo resulta especialmente importante en intercambiadores de calor utilizados en sistemas de refrigeración líquida o en intercambiadores con superficies extendidas.

Por último, la radiación térmica se refiere a la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio material para su propagación. Aunque en muchos intercambiadores su influencia es menor que la de los procesos de conducción o convección, este mecanismo puede adquirir relevancia en sistemas que operan a temperaturas elevadas, como ocurre en procesos metalúrgicos o en instalaciones solares térmicas [5].

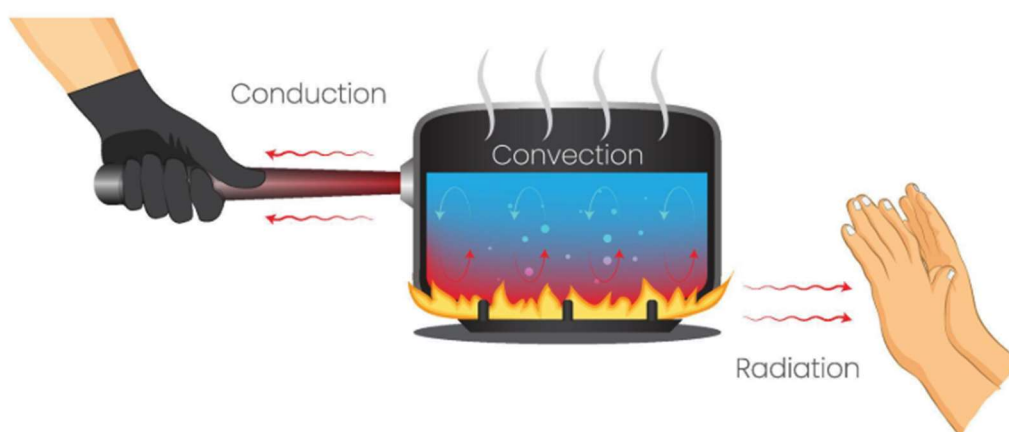


Figura 2-3 Formas de transferencia de calor [6].

Teniendo en cuenta la diversidad de intercambiadores de calor existentes, los cuales varían en disposición, materiales, tamaños y aplicaciones, es posible clasificarlos según dos criterios principales.

2.2.1 Según los procesos de transferencia

En esta sección se van a diferenciar tres tipos de intercambiadores, clasificados según el proceso que utilizan para transmitir calor [7]:

Los intercambiadores de contacto directo son aquellos que permiten la transferencia de calor mediante la mezcla de fluidos calientes y fríos. Se emplean en procesos donde la interacción directa entre los fluidos no supone un inconveniente, como en torres de enfriamiento industriales y en sistemas de condensación de gases. Aunque presentan una elevada eficiencia térmica, su uso está limitado por la posible contaminación cruzada y por la necesidad de separar posteriormente los fluidos.

Por otro lado, los intercambiadores de contacto indirecto realizan la transferencia de calor a través de una barrera sólida que evita la mezcla de los fluidos. Dentro de esta categoría se incluyen los intercambiadores de carcasa y tubos, de placas y de microcanales. En particular, los intercambiadores de microcanales destacan por su elevada eficiencia térmica, derivada de su alta relación superficie-volumen y del control preciso del flujo del refrigerante.

Los intercambiadores regenerativos emplean un medio sólido que actúa como almacenamiento temporal de calor, transfiriendo la energía térmica de un fluido caliente a uno frío en distintos momentos del ciclo de operación. Son utilizados de forma habitual en hornos de fusión de vidrio y en sistemas de recuperación de calor residual. Aunque permiten mejorar la eficiencia energética del proceso, su diseño requiere una cuidadosa optimización para minimizar las pérdidas térmicas y reducir la complejidad del sistema.

2.2.2 Según el tipo de construcción

Además, otro de los criterios que se pueden utilizar para clasificar los intercambiadores de calor es su construcción [8].

Los intercambiadores de carcasa y tubos (ver figura 2-4) están formados por un haz de tubos alojado en el interior de una carcasa cilíndrica. Uno de los fluidos circula por el interior de los tubos, mientras que el otro fluye por el espacio comprendido entre los tubos y la carcasa. Debido a su versatilidad y a su capacidad para operar a altas presiones y temperaturas, son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales.

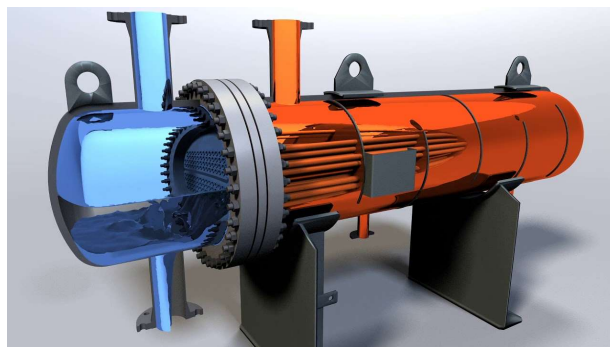


Figura 2-4 Intercambiador de carcasa y tubo [9]

Los intercambiadores de doble tubo constituyen una de las configuraciones más simples dentro de los intercambiadores de calor de contacto indirecto. Están formados por dos tubos concéntricos, de manera que el fluido caliente circula por el tubo interior mientras que el fluido frío lo hace por el espacio anular exterior. Este tipo de intercambiadores se utiliza con frecuencia en aplicaciones de pequeña escala o en sistemas experimentales debido a su diseño sencillo y a su facilidad de fabricación [8].

Los intercambiadores de tipo serpentín han sido utilizados desde principios del siglo XX en aplicaciones de calefacción, refrigeración y generación de vapor. Su diseño surge de la necesidad de aumentar el tiempo de contacto entre los fluidos para mejorar la eficiencia térmica. En sus primeras versiones se fabricaban principalmente en cobre y acero, mientras que en la actualidad se emplean aleaciones de aluminio y polímeros avanzados con el fin de incrementar la durabilidad y reducir los costes de producción. A partir de la década de 1970, el desarrollo de los sistemas HVAC y de la energía solar térmica impulsó la optimización de su geometría, permitiendo mejorar la transferencia de calor y disminuir las pérdidas de presión. Más recientemente, el uso de nanofluidos y superficies texturizadas ha contribuido a aumentar su eficiencia en aplicaciones industriales, aeroespaciales y automotrices.

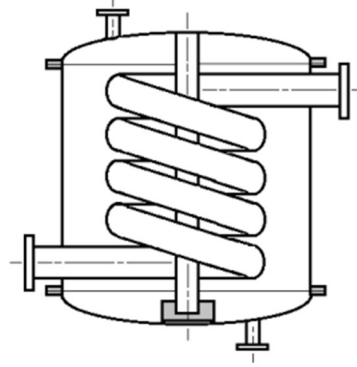


Figura 2-5 Intercambiador de tipo serpentín [10]

Finalmente, los intercambiadores de placas están compuestos por un conjunto de placas metálicas delgadas dispuestas en paralelo, que generan canales alternos para la circulación de los fluidos. Este tipo de intercambiadores se caracteriza por ofrecer una gran superficie de transferencia térmica en un volumen reducido, lo que los convierte en una solución compacta y eficiente en aplicaciones industriales donde el espacio disponible es limitado [11].

2.3 Intercambiadores de microcanales

Los intercambiadores de calor de microcanales representan una evolución significativa respecto a los intercambiadores convencionales, especialmente en aplicaciones donde el espacio disponible es limitado y las cargas térmicas son elevadas. Estos dispositivos se caracterizan por la presencia de canales de dimensiones micrométricas, lo que incrementa notablemente la superficie de intercambio térmico por unidad de volumen [12].

El uso de microcanales permite alcanzar altos coeficientes de transferencia de calor, lo que se traduce en una mayor capacidad de disipación térmica. Esta característica ha motivado su aplicación en sistemas de refrigeración líquida para dispositivos electrónicos, donde la eficiencia térmica es un factor crítico.

Desde los primeros estudios experimentales sobre microcanales, se ha demostrado que su geometría, dimensiones y disposición influyen de forma determinante en el comportamiento térmico e hidráulico del sistema. Parámetros como el diámetro hidráulico, la longitud del canal, la rugosidad superficial y el régimen de flujo afectan tanto a la transferencia de calor como a las pérdidas de carga.

Uno de los principales retos asociados a los intercambiadores de microcanales es el compromiso entre la mejora de la transferencia térmica y el aumento de la pérdida de carga. Un diseño óptimo debe equilibrar ambos aspectos para garantizar un funcionamiento eficiente del sistema de refrigeración sin un consumo energético excesivo en la bomba.

La investigación en este campo ha avanzado mediante estudios experimentales y simulaciones numéricas. Sin embargo, la validez de los modelos teóricos depende en gran medida de la disponibilidad de datos experimentales fiables, obtenidos a partir de bancos de ensayos específicamente diseñados para este tipo de intercambiadores.

A continuación se detallan las geometrías más comunes de estos intercambiadores y se expone la razón de su eficiencia y el por qué de su utilización.

2.3.1 Geometría interna de los intercambiadores

La evolución de los sistemas de refrigeración para dispositivos electrónicos de alta densidad de potencia ha derivado en el desarrollo de diversas configuraciones geométricas de intercambiadores de

calor de microcanales (MCHS). El concepto fundamental, introducido por Tuckerman y Pease (1981), establece que el coeficiente de transferencia de calor es inversamente proporcional al diámetro hidráulico del canal, lo que favorece el uso de dimensiones microscópicas para gestionar flujos térmicos elevados.

A continuación se detallan las geometrías identificadas en la literatura técnica, clasificadas según su complejidad y aplicación funcional [13], [14]:

1. Geometrías de Sección Transversal Constante (Canales Rectos)

Son las configuraciones más comunes debido a su relativa sencillez de fabricación y análisis:

- Rectangular (RMCHS): Es la geometría estándar, consistente en un bloque sólido de silicio, cobre o aluminio con aletas longitudinales que forman canales rectangulares. Es la primera opción para enfriamiento en integración a gran escala (VLSI).
- Circular: Empleada frecuentemente en estudios analíticos de flujo laminar y con nanofluidos. Se ha demostrado que la transferencia de calor en estos canales es altamente dependiente del diámetro y del número de Reynolds.
- Trapezoidal: Utilizada para investigar el efecto del material del sustrato y la interacción con nanopartículas, mostrando que la difusividad térmica del material del intercambiador es crítica para su rendimiento.
- Triangular: Útil para comparar la eficiencia de diferentes tipos de nanofluidos, observándose que los fluidos con nanopartículas de diamante ofrecen los mejores coeficientes en esta forma específica.

2. Geometrías Multicapa y de Flujo Avanzado

Estas están diseñadas para solucionar el problema de la distribución no uniforme de la temperatura en la superficie del chip:

- Doble Capa (DL-MCHS): Consiste en dos niveles superpuestos de microcanales. El refrigerante suele fluir en contracorriente (la capa superior en dirección opuesta a la inferior), lo que permite que el fluido frío de la capa superior enfríe al fluido más caliente de la capa inferior, logrando una temperatura mucho más uniforme en el procesador.
- Doble Lado (Sandwich): Configuración donde los microcanales se integran en ambos lados de la fuente de calor para maximizar la disipación.
- Con Distribuidores en T: Diseños que incorporan colectores de entrada y salida con divisiones de flujo en forma de "T" para evitar la mala distribución del refrigerante entre los canales paralelos, reduciendo así los puntos calientes.

3. Geometrías Complejas y Discontinuas (Pasivas)

Buscan aumentar la turbulencia y romper la capa límite térmica sin necesidad de energía externa adicional:

- Canales Ondulados o Sinusoidales (Wavy Channels): Esta estructura induce la formación de vórtices y mejora la mezcla del fluido, superando el rendimiento de los canales rectos, aunque a cambio de una mayor caída de presión.
- Micro Aletas de Aguja (Micro Pin Fin - MPFHS): En lugar de canales continuos, se utiliza una matriz de pequeñas columnas (circulares, cuadradas, elípticas o triangulares). Estas aumentan la compacidad y el área de transferencia, rompiendo constantemente la capa límite.

- Canales con Cavidades y Ranuras: Incorporan modificaciones a lo largo del eje longitudinal, como cavidades laterales o ranuras triangulares, para promover la mezcla del fluido en condiciones de flujo laminar.

- Corrugados: Canales que presentan variaciones periódicas en su sección para inducir una transferencia de calor superior a la de los minicanales rectos.

4. Configuraciones Especializadas y Nuevas Tecnologías

- Cilíndrica: Microcanales dispuestos radialmente alrededor de un bloque cilíndrico central que contiene una fuente de calor (como un calentador de cartucho).

- Ancha (Wide MCHS): Consiste en un canal único o paralelo donde el ancho es significativamente superior a la altura, estudiado para analizar efectos de conducción axial.

- Multi-puerto (Multiport): Intercambiadores integrados con múltiples puertos pequeños, comúnmente acoplados a módulos termoelectricos (TEC).

- Estructuras de Espuma Metálica (Foam Heat Sink): Uso de espumas de aluminio para crear una estructura porosa de alta superficie que maximiza el contacto con el refrigerante.

- Cámara de Vapor (Vapor Chamber): Sistemas planos que utilizan el cambio de fase (evaporación y condensación) de un fluido en una estructura de polvo de cobre sinterizado para esparcir el calor de manera uniforme.

- Jet Impingement (Chorro de Impacto): Configuración donde el refrigerante impacta directamente sobre la superficie caliente a través de boquillas, logrando coeficientes de transferencia de calor locales extremadamente altos debido a la reducción del espesor de la capa límite en el punto de estancamiento.



Figura 2-6 Intercambiadores de microcanales según geometría interna (Imagen generada con IA)

2.4 Panorama actual de la investigación y necesidad de experimentación

La refrigeración líquida y, en particular, los intercambiadores de calor de microcanales, constituyen un campo de estudio ampliamente investigado desde el punto de vista teórico y numérico [15]. A lo largo de las últimas décadas se han desarrollado numerosos modelos analíticos y correlaciones empíricas que permiten describir con precisión el comportamiento termo-hidráulico de estos dispositivos bajo diferentes condiciones de operación. Asimismo, las herramientas de simulación numérica han alcanzado un alto grado de madurez, facilitando el análisis detallado de campos de velocidad, temperatura y distribución de presiones en geometrías complejas.

Gracias a estos avances, actualmente se dispone de un conocimiento sólido sobre la influencia de parámetros como la geometría del microcanal, el régimen de flujo, las propiedades termofísicas del fluido refrigerante y las condiciones de contorno en el rendimiento térmico de los intercambiadores [16]. Este conocimiento ha permitido optimizar diseños y predecir su comportamiento con un elevado grado de fiabilidad en entornos controlados.

No obstante, a pesar de la abundancia de estudios teóricos y numéricos, la literatura reciente pone de manifiesto una limitada disponibilidad de estudios experimentales actuales [17], especialmente aquellos realizados mediante bancos de ensayos flexibles y específicamente diseñados para la comparación sistemática de diferentes configuraciones y fluidos refrigerantes. Muchos de los experimentos disponibles se realizaron en etapas tempranas del desarrollo de los microcanales o se centran en configuraciones muy concretas, lo que dificulta la extrapolación de los resultados a otros diseños o condiciones de funcionamiento.

Además, una parte significativa de los estudios experimentales existentes presenta limitaciones asociadas a la instrumentación, al control preciso de las condiciones de operación o a la repetibilidad de los ensayos. En numerosos casos, el análisis se centra únicamente en el rendimiento térmico, sin considerar de forma conjunta el impacto hidráulico, a pesar de que el aumento de las pérdidas de carga constituye uno de los principales retos en sistemas de refrigeración líquida. Esta falta de datos experimentales integrales limita la validación de los modelos teóricos y numéricos actualmente disponibles [18].

En este contexto, se identifica una clara necesidad de nuevos ensayos experimentales que permitan actualizar y complementar el conocimiento existente, proporcionando datos fiables y reproducibles obtenidos bajo condiciones controladas. El diseño de un banco de ensayos específico y versátil resulta fundamental para evaluar de manera rigurosa el comportamiento térmico e hidráulico de intercambiadores de calor con refrigeración líquida, así como para comparar el rendimiento de distintos fluidos de trabajo.

Por tanto, aunque el marco teórico y numérico de la refrigeración líquida mediante microcanales se encuentra ampliamente desarrollado, la escasez relativa de experimentación reciente y sistemática justifica la necesidad de infraestructuras experimentales adecuadas. En este sentido, el presente trabajo se orienta al diseño y desarrollo de un banco de ensayos que permita contribuir al estado del arte mediante la obtención de nuevos datos experimentales y la evaluación comparativa del rendimiento energético de diferentes configuraciones y fluidos refrigerantes.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Concepto y funcionamiento del banco

El objetivo del banco de ensayos desarrollado en este trabajo es permitir el estudio experimental del comportamiento térmico e hidráulico de intercambiadores de calor de microcanales utilizados en sistemas de refrigeración líquida para electrónica. Para ello, se ha diseñado un banco modular en el que se plantea la posibilidad de estudiar intercambiadores de diferentes intercambiadores de calor y distintos tipos de fluidos para comprobar su eficiencia y funcionalidad.

El sistema diseñado consiste en un circuito cerrado en el que un fluido es impulsado mediante una bomba a través del intercambiador de calor objeto de estudio. Durante su paso por el intercambiador, el fluido absorbe la energía térmica generada por un elemento calefactor que simula la disipación térmica de un componente electrónico.

Una vez que el fluido ha absorbido calor, este es conducido hacia un sistema de disipación térmica, generalmente compuesto por un radiador o intercambiador aire-líquido, donde se evacúa el calor al ambiente. Posteriormente el fluido retorna al depósito del sistema, desde donde vuelve a ser impulsado por la bomba, cerrando así el circuito hidráulico.

En la siguiente ilustración (ver figura 3-1) se puede observar un esquema funcional del circuito por el que circularía el fluido seleccionado:

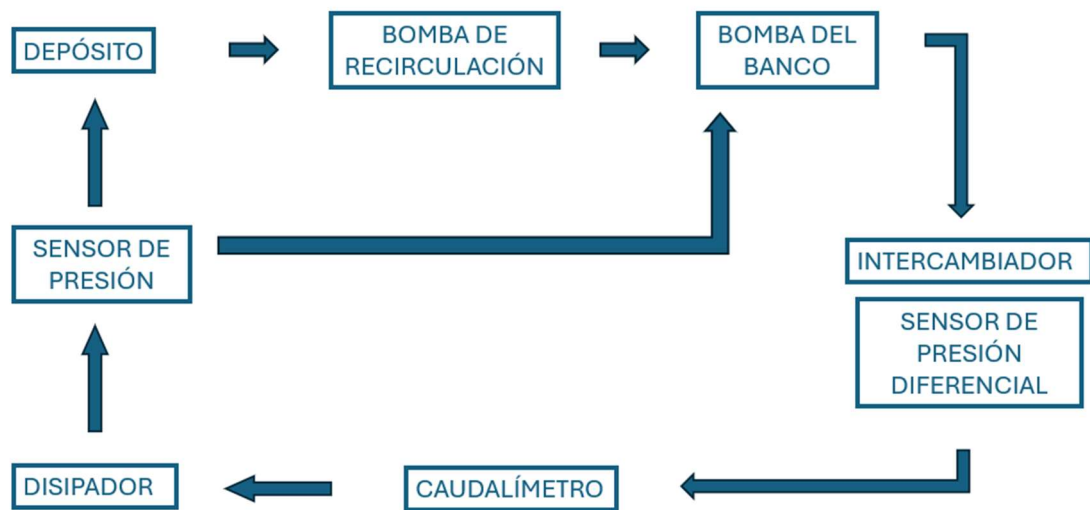


Figura 3-1 Esquema funcional del circuito

El banco de ensayos incorpora distintos sensores que permiten medir las principales variables necesarias para la caracterización del sistema. Entre las variables de interés destacan la temperatura del fluido en diferentes puntos del circuito, el caudal del fluido circulante y, en algunos casos, las pérdidas de carga generadas en el intercambiador.

A partir de estas medidas es posible evaluar parámetros relevantes como la capacidad de transferencia de calor del intercambiador, su comportamiento térmico en diferentes condiciones de operación y las pérdidas hidráulicas asociadas al flujo a través de los microcanales.

De esta forma, el banco de ensayos constituye una herramienta experimental que permite analizar el rendimiento de intercambiadores de microcanales diferentes (siempre con la misma geometría 40x80 mm) y estudiar su aplicación en sistemas de refrigeración líquida para electrónica de alta potencia.

En la siguiente imagen (ver figura 3-2) se presenta un croquis simplificado de la distribución del banco de ensayos en los inicios del proyecto.

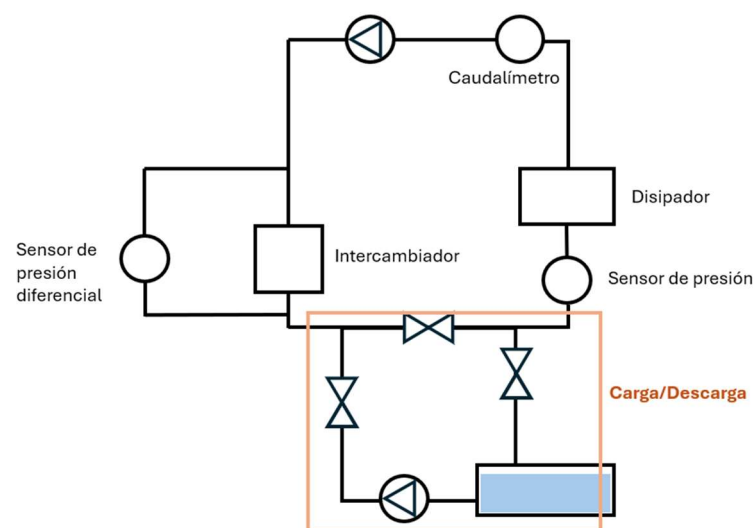


Figura 3-2 Dibujo simplificado del banco

3.2 Criterios de diseño

El diseño del banco de ensayos se ha desarrollado atendiendo a una serie de criterios técnicos cuyo objetivo es garantizar su funcionalidad como herramienta experimental para el estudio de sistemas de refrigeración líquida. Estos criterios han guiado tanto la configuración general del banco como la selección de los distintos componentes que lo integran.

En primer lugar, se ha buscado que el banco de ensayos presente una configuración compacta y poco voluminosa, de forma que pueda instalarse fácilmente en un entorno de laboratorio sin requerir grandes espacios. Este criterio ha condicionado la disposición de los distintos elementos del circuito hidráulico, procurando una distribución que permita integrar todos los componentes de forma ordenada y accesible, manteniendo al mismo tiempo un tamaño reducido del conjunto.

Otro de los criterios fundamentales ha sido la capacidad de controlar las condiciones de presión del sistema, permitiendo tanto la presurización como la despresurización del circuito según las necesidades del ensayo. Esta característica resulta importante para poder reproducir distintas condiciones de funcionamiento del sistema de refrigeración líquida y garantizar un funcionamiento seguro durante la operación del banco.

Asimismo, el banco de ensayos se ha diseñado con el objetivo de ofrecer flexibilidad en la evaluación de distintos intercambiadores de calor. Para ello, se ha planteado una configuración que permite sustituir el intercambiador de forma sencilla, facilitando la realización de ensayos comparativos entre diferentes geometrías o modelos sin necesidad de modificar el resto del circuito hidráulico.

Del mismo modo, el sistema se ha concebido para permitir el uso de diferentes fluidos de trabajo, lo que amplía las posibilidades experimentales del banco. Esta característica permite analizar el comportamiento del sistema de refrigeración con distintos refrigerantes, teniendo en cuenta sus propiedades termofísicas y su influencia en el rendimiento térmico e hidráulico del intercambiador.

Por último, se ha considerado como criterio esencial la capacidad de monitorizar las principales variables del sistema. Para ello, el banco incorpora distintos sensores que permiten medir magnitudes relevantes como el caudal del fluido, la presión en el circuito y la presión diferencial en el intercambiador de calor. La correcta instrumentación del sistema resulta fundamental para obtener datos experimentales fiables que permitan analizar el comportamiento del sistema de refrigeración.

En conjunto, estos criterios han permitido definir una configuración de banco de ensayos compacta, flexible y adecuadamente instrumentada, capaz de servir como plataforma experimental para el análisis del comportamiento térmico e hidráulico de intercambiadores de calor en sistemas de refrigeración líquida

Con el objetivo de sintetizar las principales características del banco de ensayos diseñado, en la Tabla 3-1 se presentan los parámetros generales del sistema.

Parámetro	Valor
Fluido de trabajo	Intercambiable
Volumen del circuito	1,5 L
Caudal máximo	300 L/h
Presión máxima	8 bar
Intercambiadores ensayables	40x80 mm

Tabla 3-1 Principales parámetros del banco

3.3 Descripción general del banco diseñado

El banco de ensayos diseñado se ha estructurado en tres divisiones principales, cada una de ellas asociada a una función específica dentro del circuito hidráulico y del sistema de medida.

En primer lugar, se encuentra la parte central del banco, que constituye la sección principal del sistema y donde se localizan los elementos directamente relacionados con el análisis del comportamiento del fluido y del intercambiador de calor. En esta zona se encuentran el disipador, el caudalímetro, un sensor de presión, la bomba encargada de impulsar el fluido a través del circuito y el intercambiador de calor objeto de estudio. Este último elemento es el componente fundamental del banco de ensayos, ya que es donde se produce la transferencia térmica que se pretende analizar. Con el objetivo de permitir la realización de distintos experimentos y comparar el rendimiento de diferentes configuraciones, el diseño del banco se ha planteado de forma que el intercambiador de calor pueda sustituirse fácilmente, permitiendo ensayar distintos modelos sin necesidad de modificar el resto de la instalación.

La segunda división corresponde al sistema de recirculación del fluido, que resulta imprescindible para garantizar el funcionamiento continuo del banco de ensayos. En esta parte del sistema se dispone un depósito de almacenamiento con una capacidad de 1,5 litros, en el que se encuentra contenido el fluido de trabajo. Este depósito actúa como punto de alimentación del circuito y permite mantener un volumen estable de fluido durante el funcionamiento del sistema. Asociado a este depósito se encuentra una bomba que proporciona la presión necesaria para impulsar el fluido a través del circuito, garantizando así la circulación del refrigerante por todos los elementos que componen el banco. Cabe destacar que esta sección del banco, las tuberías que se han implementado no son del mismo diámetro que las del resto de la instalación, ya que debido a la necesidad de dar presión al circuito se ha doblado la medida del mismo.

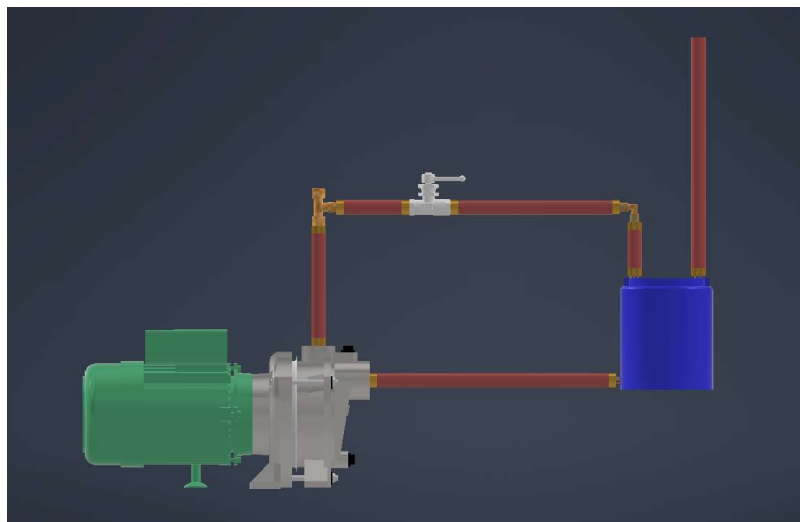


Figura 3-3 Circuito de recirculación (Diseño CAD)

Por último, el banco de ensayos incorpora un sensor de presión diferencial, destinado a medir la diferencia de presión entre distintos puntos del sistema, lo que permite analizar el comportamiento hidráulico del intercambiador y del circuito. Este sensor se integra en el banco mediante tubos flexibles, lo que facilita su instalación y permite una mayor flexibilidad en su colocación dentro del sistema. Además, el sensor se ha situado en la parte más elevada del banco, acompañado de un purgador automático, con el fin de facilitar la eliminación de posibles bolsas de aire que puedan formarse en el circuito y asegurar así un funcionamiento adecuado del sistema de medida.



Figura 3-4 Sensor diferencial depresión con purgador automático (Diseño CAD)

3.4 Selección de componentes

La selección de los componentes del banco de ensayos se ha realizado atendiendo a criterios funcionales, hidráulicos y constructivos, con el objetivo de garantizar un funcionamiento estable del sistema. Asimismo, se ha buscado que el conjunto presente una configuración modular, de modo que resulte posible sustituir determinados elementos, especialmente el intercambiador de calor, sin necesidad de rediseñar el resto de la instalación.

Dado que el banco de ensayos se ha concebido para trabajar con un circuito de refrigeración líquida cerrado, la elección de cada componente se ha llevado a cabo considerando su compatibilidad con el fluido de trabajo, su integración geométrica en el diseño y la necesidad de emplear conexiones normalizadas. En este sentido, se ha adoptado la rosca G 1/4 como estándar de conexión en los distintos elementos del circuito, lo que facilita el montaje mediante racores comerciales y simplifica la sustitución de componentes, sin embargo, ha sido necesario adoptar otro tipo de roscas en determinadas conexiones del sistema.

A continuación, se describen los principales elementos seleccionados para el diseño del banco de ensayos:

- *Intercambiador de calor*

El intercambiador de calor es el componente principal del banco de ensayos y el elemento sobre el que se centra el estudio experimental. El principal requerimiento es que los intercambiadores sometidos al estudio deben tener unas dimensiones de 40x80mm. Su función es permitir la transferencia térmica entre el fluido refrigerante y la superficie o volumen sometido a ensayo. Dado que el objetivo del banco es analizar el comportamiento térmico e hidráulico de diferentes configuraciones, el diseño se ha planteado de forma que el intercambiador pueda sustituirse fácilmente.

Este criterio de modularidad resulta fundamental, ya que permite ensayar distintos modelos de intercambiadores sin modificar el resto de la instalación. Para facilitar su integración, se han seleccionado configuraciones con puertos de conexión G 1/4, compatibles con los racores y tuberías empleados en el sistema. Cabe destacar la flexibilidad de las tuberías que se anexionan al mismo dando

la capacidad de que los distintos intercambiadores que se exponen al análisis tengan los puertos de conexión en lugares diferentes.

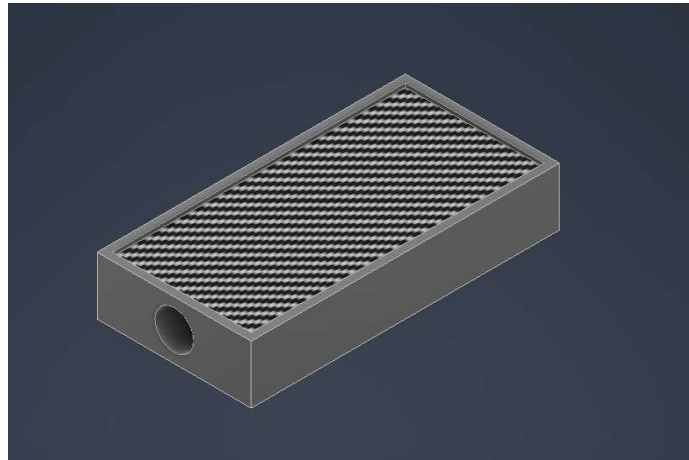


Figura 3-5 Intercambiador modelo (CAD)

- *Disipador*

Uno de los elementos fundamentales del banco de ensayos es el sistema de disipación térmica, cuya función es eliminar el calor del fluido de trabajo una vez que ha circulado por el intercambiador de calor. Este sistema permite restablecer las condiciones térmicas del fluido antes de su recirculación en el circuito, garantizando así la repetibilidad y estabilidad de los ensayos experimentales.

El sistema de disipación utilizado está compuesto por dos elementos principales ensamblados entre sí: un radiador de refrigeración líquida y un conjunto de ventiladores encargados de forzar el flujo de aire a través del mismo.

El radiador seleccionado para el banco de ensayos es el Corsair Hydro X Series XR5 Neo de 240 mm [19], diseñado originalmente para sistemas de refrigeración líquida en equipos informáticos de alto rendimiento. Este tipo de radiadores se caracteriza por su elevada capacidad de intercambio térmico en un volumen relativamente compacto, lo que lo hace adecuado para aplicaciones experimentales como la desarrollada en este trabajo.

El radiador está constituido por un núcleo de cobre, material que presenta una elevada conductividad térmica y que favorece la transferencia de calor entre el fluido que circula por su interior y el aire que atraviesa el radiador. El fluido procedente del circuito del banco circula a través de una red de canales internos y aletas metálicas que aumentan significativamente la superficie de intercambio térmico.

Este modelo dispone de conexiones roscadas estándar G1/4, ampliamente utilizadas en sistemas de refrigeración líquida, lo que facilita su integración dentro del circuito hidráulico del banco de ensayos mediante los racores y conexiones utilizados en el resto del sistema.

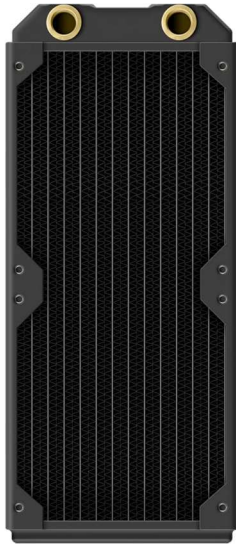


Figura 3-6 Corsair Hydro X Series XR5 Neo [19] y diseño CAD

Para mejorar la disipación térmica del radiador se han incorporado dos ventiladores axiales de 120 mm [20], encargados de generar un flujo de aire forzado a través de las aletas del radiador. Los ventiladores seleccionados operan a una velocidad máxima aproximada de 2700 rpm, lo que permite incrementar la transferencia de calor entre el radiador y el aire ambiente.

El uso de ventilación forzada resulta fundamental para mejorar la eficiencia del proceso de disipación térmica, ya que aumenta el coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie del radiador. De este modo, el calor transportado por el fluido puede ser transferido al aire de forma más eficiente.

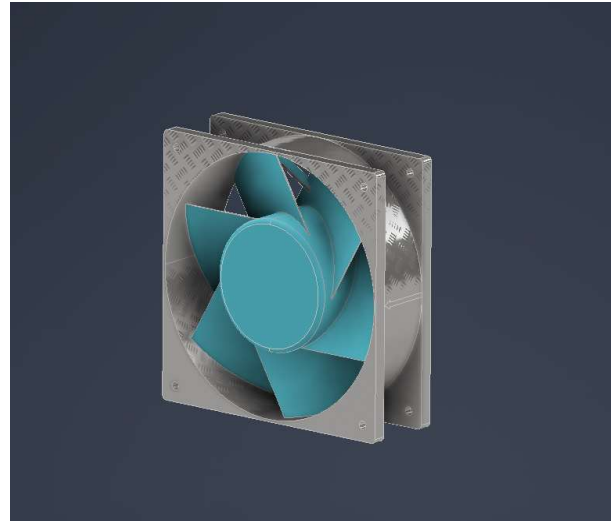


Figura 3-7 Ventiladores axiales de 120 mm [20] y diseño CAD

El conjunto formado por el radiador y los ventiladores constituye el sistema de enfriamiento del circuito, siendo un elemento esencial para el correcto funcionamiento del banco de ensayos. Su función principal consiste en reducir la temperatura del fluido antes de que este vuelva a circular por el

intercambiador de calor, permitiendo mantener condiciones de operación estables durante la realización de los experimentos.

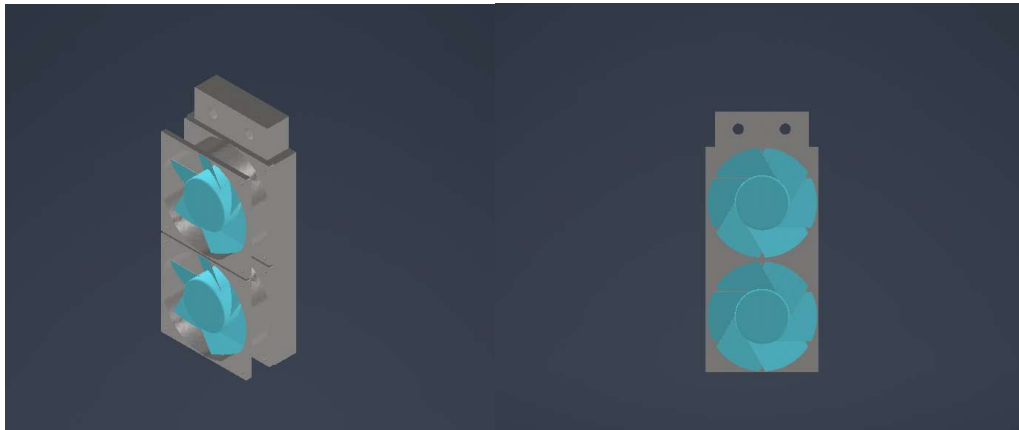


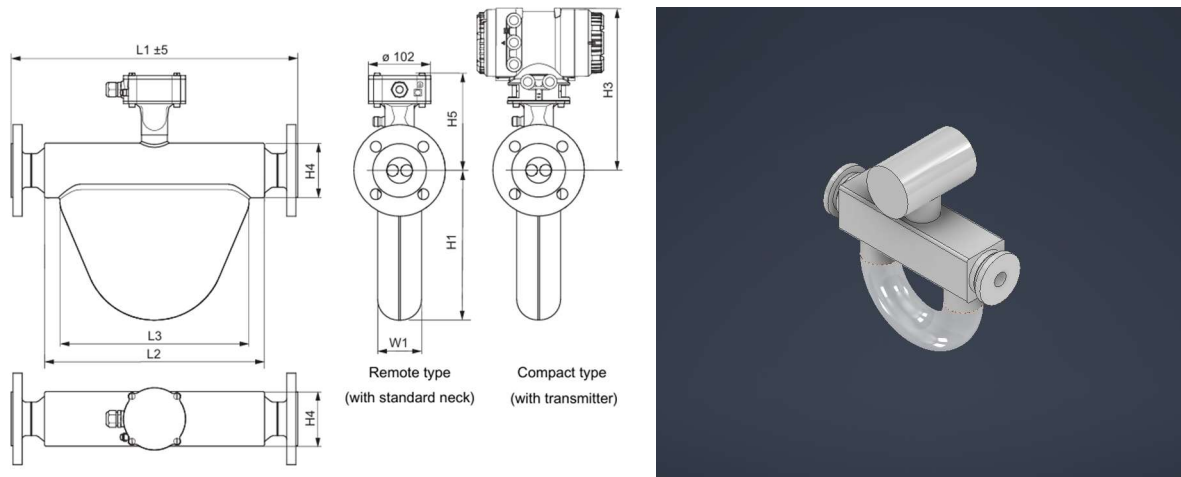
Figura 3-8 Ensamblaje del disipador diseño CAD

- *Caudalímetro*

La medición del caudal del fluido dentro del banco de ensayos se realiza mediante un caudalímetro de tipo Coriolis, basado en la tecnología SITRANS FC5x0 desarrollada por Siemens. Este tipo de instrumento permite medir de forma directa el caudal másico del fluido, además de otras magnitudes asociadas como la densidad y la temperatura, lo que lo convierte en un dispositivo ampliamente utilizado en aplicaciones de control de procesos y experimentación en sistemas hidráulicos.

El principio de funcionamiento de estos caudalímetros se basa en la generación de fuerzas de Coriolis en tubos vibrantes. El sensor del instrumento induce una vibración controlada en los tubos de medida, y cuando el fluido circula a través de ellos se generan fuerzas proporcionales al caudal másico. Estas fuerzas provocan una ligera deformación o desfase en la vibración de los tubos, que es detectada mediante sensores y posteriormente procesada por el transmisor del dispositivo para determinar el caudal del fluido.

El modelo utilizado en el diseño del banco de ensayos corresponde a un sensor SITRANS FC500 con diámetro nominal DN10, perteneciente a la serie SITRANS FC520/FC540. Este tamaño de sensor es adecuado para aplicaciones de laboratorio y bancos de ensayo, ya que permite trabajar con caudales relativamente bajos manteniendo una elevada precisión de medida. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el sensor DN10 presenta un caudal nominal aproximado de 1,60 t/h y un caudal máximo de 2,30 t/h, con un caudal volumétrico máximo del orden de 2,3 m³/h para agua, lo que resulta suficiente para las condiciones de operación previstas en el banco de ensayos [21].



Meter size	L2	L3	H1	H3	H4	H5	W1
	in mm (inch)						
FCS500 DN10	190 (7.5)	165 (6.5)	117 (4.6)	268 (10.6)	56 (2.2)	138 (5.4)	42 (1.7)

Figura 3-9 Medidas del caudalímetro utilizado y diseño CAD [21]

Además, el caudalímetro permite medir simultáneamente masa, volumen, densidad y temperatura del fluido, lo que facilita el análisis del comportamiento térmico del intercambiador durante los ensayos experimentales. Estas variables pueden ser posteriormente utilizadas para calcular parámetros adicionales del proceso, como el caudal volumétrico o la concentración en mezclas de fluidos.

La elección de este tipo de instrumento se debe a su alta precisión, fiabilidad y capacidad de medición directa del caudal másico, características especialmente relevantes en aplicaciones experimentales donde es necesario disponer de medidas precisas para el análisis del rendimiento de los intercambiadores de calor.

- Bomba del banco

Para garantizar la circulación del fluido a través del circuito hidráulico del banco de ensayos se ha seleccionado una bomba centrífuga EHEIM Universal 300 [22], diseñada para aplicaciones de recirculación de agua en sistemas compactos. Este tipo de bombas se utiliza habitualmente en instalaciones de laboratorio, sistemas de refrigeración líquida y pequeños circuitos hidráulicos, debido a su fiabilidad, bajo consumo energético y funcionamiento continuo.

La bomba EHEIM Universal 300 es una bomba sumergible de pequeño tamaño, lo que permite su instalación directamente en el depósito de recirculación del banco de ensayos. Su diseño compacto facilita la integración dentro del sistema experimental, permitiendo mantener un circuito hidráulico sencillo y reduciendo el número de conexiones externas.

Desde el punto de vista de funcionamiento, la bomba opera mediante un impulsor centrífugo accionado por un motor eléctrico, encargado de transferir energía al fluido y generar el movimiento del mismo a través del circuito. Este tipo de configuración proporciona un flujo relativamente estable y adecuado para aplicaciones de recirculación en sistemas de ensayo.

Las principales características técnicas del modelo seleccionado se muestran a continuación:

Parámetro	Valor
Caudal máximo	300 L/h
Altura máxima de impulsión	1,20 m
Potencia consumida	5 W
Dimensiones (alto × ancho × profundidad)	103 × 146 × 75 mm

Tabla 3-2 Principales parámetros de la bomba

El caudal máximo de 300 L/h permite garantizar la circulación del fluido a través de todos los elementos del banco de ensayos, incluyendo el intercambiador de calor, los sensores de medida y el resto de los accesorios hidráulicos. Asimismo, la altura de impulsión máxima de 1,20 m resulta suficiente para vencer las pérdidas de carga generadas en el circuito experimental.

La selección de este modelo se ha realizado considerando su bajo consumo energético, su tamaño reducido y su capacidad para proporcionar un caudal adecuado para el rango de funcionamiento del banco de ensayos, permitiendo así realizar los experimentos de forma estable y controlada.

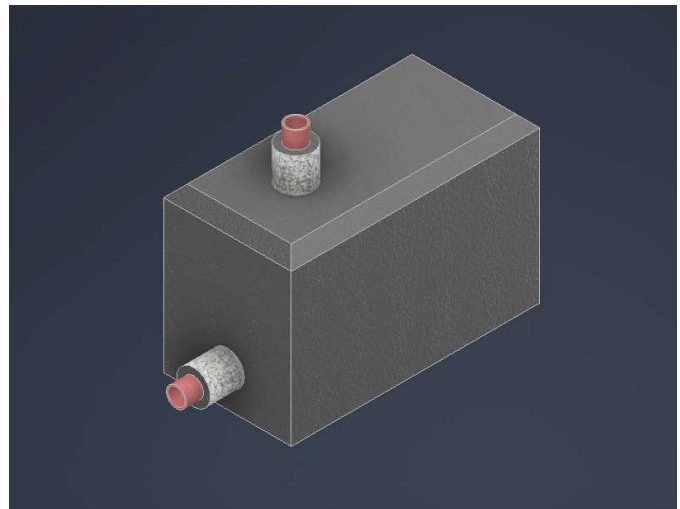


Figura 3-10 Bomba centrífuga EHEIM Universal 300 [22] y diseño CAD

- *Bomba de recirculación*

La circulación del fluido a través del banco de ensayos se realiza mediante una bomba centrífuga de recirculación, cuya función es proporcionar la energía necesaria para impulsar el fluido a lo largo del circuito hidráulico y vencer las pérdidas de carga introducidas por los diferentes elementos del sistema, tales como el intercambiador de calor, las tuberías, los sensores y los accesorios de conexión.

Para este banco de ensayos se ha seleccionado una bomba centrífuga de acero inoxidable modelo KI, fabricada por SACI Pumps, diseñada para aplicaciones de impulsión de líquidos en sistemas industriales y de recirculación. Este tipo de bomba se caracteriza por su configuración de impulsor simple y aspiración axial, lo que permite obtener un funcionamiento estable y una circulación continua del fluido en circuitos cerrados [23].

El cuerpo de la bomba y el impulsor están fabricados en acero inoxidable AISI 304, lo que proporciona una elevada resistencia a la corrosión y una buena durabilidad frente al contacto prolongado con fluidos de base acuosa. Además, el sistema de sellado mecánico está compuesto por materiales carbono–cerámica y NBR, lo que garantiza un funcionamiento fiable y reduce el riesgo de fugas durante la operación del banco [23].

Desde el punto de vista hidráulico, la bomba presenta un rango de funcionamiento con caudales de hasta 11 m³/h y alturas manométricas de hasta 40 m, valores que permiten asegurar la correcta circulación del fluido en el circuito del banco de ensayos incluso en presencia de pérdidas de carga significativas. Asimismo, el equipo está diseñado para trabajar con líquidos limpios y no agresivos con propiedades similares al agua, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de refrigeración líquida [23].

En cuanto a las condiciones de operación, la bomba admite temperaturas del fluido comprendidas entre –10 °C y 90 °C, con una presión máxima de trabajo de 8 bar, lo que proporciona un amplio margen de funcionamiento dentro de las condiciones previstas para los ensayos experimentales. El motor eléctrico asociado es de tipo asíncrono con ventilación externa, equipado con protección termoamperimétrica integrada para garantizar la seguridad del sistema durante su funcionamiento [23].

La selección de este modelo se ha realizado considerando su compatibilidad con el tipo de fluido utilizado, su robustez constructiva y su capacidad para proporcionar un caudal estable dentro del rango de operación requerido por el banco de ensayos.

En la siguiente tabla (ver tabla 3-3) se reflejan algunos de los datos más reseñables de la bomba.

Parámetro	Valor
Caudal máximo	1100 L/h
Altura máxima de impulsión	3 m
Presión máxima	8 bar

Tabla 3-3 Principales parámetros de la bomba [24]

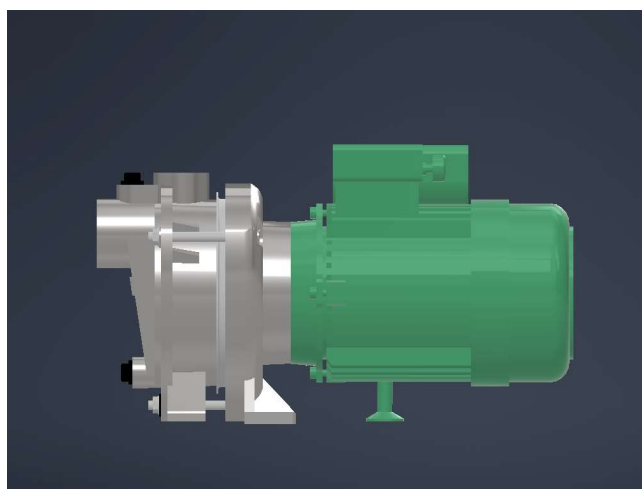


Figura 3-11 Bomba de recirculación y modelo CAD

- *Tanque*

El depósito constituye el elemento de almacenamiento del fluido de trabajo y desempeña una función esencial en el circuito, ya que actúa como punto de alimentación del sistema y como volumen de reserva durante la recirculación. Para el presente diseño se ha seleccionado un depósito de 1,5 litros de capacidad, volumen considerado suficiente para garantizar la continuidad del flujo en un banco de ensayos de escala reducida y permitir un funcionamiento estable sin incrementar excesivamente el tamaño del conjunto.

Además de almacenar el fluido, el depósito facilita las operaciones de llenado, vaciado y purga del circuito, así como la disipación parcial de calor por intercambio con el entorno. Desde el punto de vista geométrico, se ha optado por una configuración cilíndrica compacta, adecuada para su integración en la estructura del banco y compatible con el resto de los elementos del sistema.

- *Sensor de presión*

Con el objetivo de monitorizar las condiciones de funcionamiento del circuito hidráulico del banco de ensayos, se ha incorporado un sensor de presión SITRANS P210, fabricado por Siemens. Este dispositivo permite medir la presión del fluido en el circuito con elevada precisión, proporcionando información fundamental para analizar el comportamiento hidráulico del sistema durante los ensayos [25].

El SITRANS P210 es un transmisor de presión compacto diseñado para aplicaciones industriales, especialmente adecuado para la medición de presión en líquidos y gases en sistemas hidráulicos y de automatización de procesos. Este tipo de sensores se caracteriza por su robustez, precisión y facilidad de integración en sistemas de instrumentación, lo que lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones experimentales como el banco de ensayos desarrollado en este trabajo [25].

El funcionamiento del sensor se basa en un elemento de medida piezorresistivo, que detecta la deformación producida por la presión del fluido sobre una membrana interna. Esta deformación es transformada en una señal eléctrica proporcional al valor de la presión, la cual es posteriormente procesada por la electrónica integrada del transmisor para generar una señal de salida utilizable en sistemas de adquisición de datos o control.



Figura 3-12 Sensor de presión SITRANS 210 [25] y modelo CAD

- *Sensor de presión diferencial*

Con el objetivo de analizar las pérdidas de carga que se producen en el intercambiador de calor durante los ensayos experimentales, el banco de ensayos incorpora un sensor de presión diferencial SITRANS P320, fabricado por Siemens. Este dispositivo permite medir la diferencia de presión entre dos puntos del circuito hidráulico, proporcionando información fundamental para la caracterización del comportamiento hidráulico del sistema [26].

El SITRANS P320 es un transmisor de presión diferencial diseñado para aplicaciones industriales de instrumentación y control de procesos. Este tipo de sensores se emplea habitualmente en instalaciones donde es necesario determinar gradientes de presión en tuberías, filtros o intercambiadores de calor, permitiendo evaluar fenómenos como las pérdidas de carga asociadas al paso del fluido a través de un determinado elemento del sistema [26].

El funcionamiento del sensor se basa en la medición de la deformación de una membrana interna sometida a la diferencia de presión entre dos cámaras, correspondientes a las entradas de alta y baja presión del dispositivo. Esta deformación es detectada por el sistema de medida interno y transformada en una señal eléctrica proporcional al valor de la presión diferencial, que posteriormente puede ser registrada o procesada mediante un sistema de adquisición de datos.

En el banco de ensayos diseñado, el sensor de presión diferencial se encuentra conectado al circuito hidráulico mediante tuberías flexibles, que permiten tomar la presión en dos puntos distintos del sistema sin necesidad de integrar directamente el sensor en la tubería principal. No obstante, en la configuración actual del banco de ensayos, el sensor se utiliza exclusivamente para medir la diferencia de presión entre la entrada y la salida del intercambiador de calor, lo que permite determinar las pérdidas de carga generadas por este componente durante el funcionamiento del sistema.

Asimismo, el sensor se ha situado en la parte más alta del banco de ensayos, donde se ha incorporado un purgador automático. Esta disposición tiene como objetivo evitar la acumulación de burbujas de aire en las líneas de medición, ya que la presencia de aire podría afectar a la precisión de las medidas de presión diferencial. El purgador permite evacuar el aire presente en el circuito, garantizando que las líneas de presión permanezcan completamente llenas de fluido durante la realización de los ensayos.

La medición de la presión diferencial a través del intercambiador de calor constituye un parámetro clave en el análisis experimental del sistema, ya que permite evaluar las pérdidas de carga asociadas al paso del fluido y analizar el comportamiento hidráulico de los diferentes intercambiadores que pueden instalarse en el banco de ensayos.

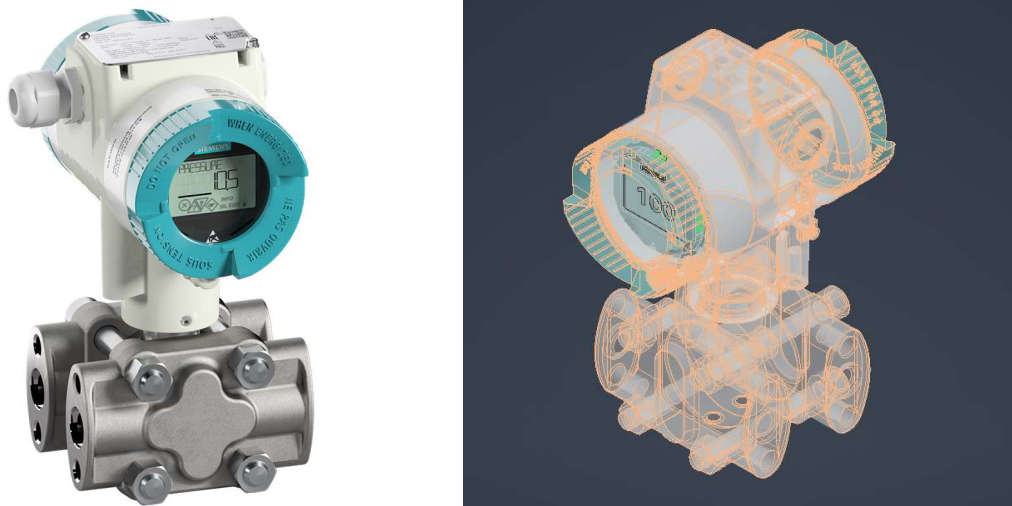


Figura 3-13 Sensor de presión diferencial SITRANS P320 [14] y modelo CAD

- *Purgador*

Para garantizar el correcto funcionamiento del circuito hidráulico del banco de ensayos, se ha incorporado un purgador automático de canalización, cuyo modelo se ha obtenido a partir de la biblioteca CAD disponible en TraceParts [27]. Este tipo de dispositivo se utiliza habitualmente en sistemas hidráulicos cerrados para eliminar el aire que puede acumularse en el interior de las tuberías.



Figura 3-14 Purgador automático de canalización [16] y modelo CAD

Durante el funcionamiento de un circuito de recirculación de fluido, es habitual que pequeñas cantidades de aire queden atrapadas en el interior del sistema, ya sea durante el llenado del circuito o debido a la presencia de gases disueltos en el fluido. La acumulación de estas burbujas puede provocar diversos problemas, como disminución del caudal efectivo, aparición de ruidos en las tuberías o incluso cavitación en la bomba, afectando negativamente al rendimiento del sistema.

El purgador automático permite liberar de forma continua el aire acumulado en el circuito sin necesidad de intervención manual, lo que simplifica el funcionamiento del banco de ensayos y garantiza que el sistema permanezca correctamente purgado durante la realización de los experimentos [28].

El funcionamiento de este tipo de dispositivos se basa generalmente en un mecanismo de flotador interno. Cuando el purgador está lleno de líquido, el flotador se mantiene elevado y el orificio de salida permanece cerrado. Sin embargo, si se acumula aire en el interior del dispositivo, el nivel de líquido disminuye, el flotador desciende y se abre una pequeña válvula que permite la expulsión del aire. Una vez eliminado, el líquido vuelve a llenar la cámara, el flotador asciende y la válvula se cierra nuevamente [29].

En el banco de ensayos diseñado, el purgador se ha colocado en la parte más alta del circuito hidráulico, junto al sensor de presión diferencial. Esta posición se ha seleccionado porque el aire presente en el sistema tiende a desplazarse hacia los puntos más elevados de la instalación, lo que facilita su evacuación mediante el purgador automático [30].

La instalación de este elemento resulta especialmente importante en el banco de ensayos, ya que permite mantener las líneas de medición del sensor de presión diferencial completamente llenas de fluido, evitando errores en la medición de la diferencia de presión y garantizando una mayor precisión en los resultados experimentales.

- *Válvulas, racores y otros elementos de unión*

Además de los elementos esenciales del banco de ensayos descritos anteriormente, el diseño consta de otras piezas muy importantes sin las que el banco no cobra sentido y no sería funcional. Estos son las mangueras flexibles (verde) y tuberías de cobre (color cobre) por las que circula el fluido, los elementos de enlace como son los racores con sus tamaños y formas adecuadas y las válvulas que permiten el paso del fluido a las diferentes zonas del conjunto.

En primer lugar, en cuanto a las tuberías de cobre y mangueras flexibles, encargadas de transportar el fluido de trabajo entre los diferentes componentes del sistema. Las tuberías de cobre se emplean en aquellos tramos donde se requiere una mayor rigidez estructural y estabilidad del circuito, mientras que las mangueras flexibles permiten realizar conexiones entre elementos que requieren cierta adaptabilidad en su posicionamiento, facilitando además el montaje y mantenimiento del banco de ensayos. El uso combinado de ambos tipos de conducción permite obtener un sistema hidráulico robusto y al mismo tiempo versátil, capaz de adaptarse a la disposición espacial de los distintos componentes del banco.

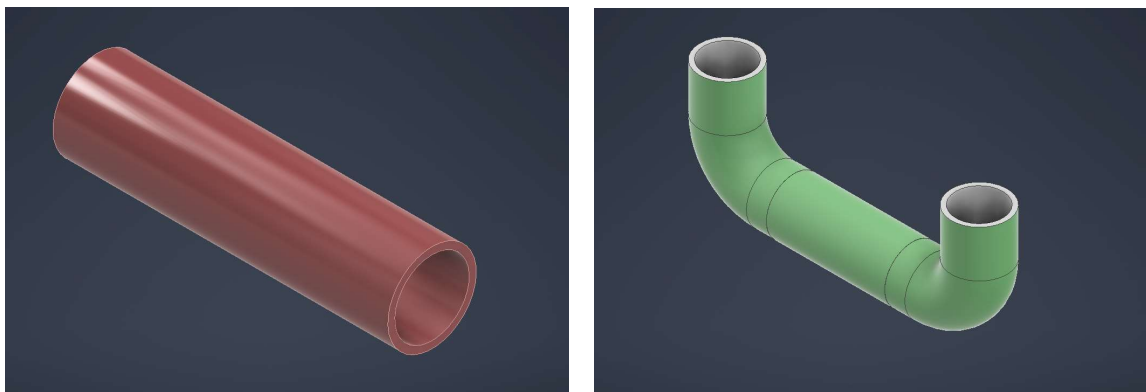


Figura 3-15 Secciones de tubería de cobre y manguera flexible (CAD)

Los racores o manguitos de conexión empleados en el diseño del banco de ensayos han sido seleccionados en función de las necesidades geométricas y funcionales del circuito hidráulico. La elección de estos elementos resulta fundamental para garantizar la correcta unión entre las tuberías y el resto de componentes del banco y es importante que cumplan la norma EN ISO 228-1 [31] que estandariza las medidas de este elemento.

Dado que la mayoría de los elementos del banco de ensayos presentan roscas estándar de tipo G 1/4" [32], se ha optado por utilizar racores compatibles con este tipo de conexión. Esta elección permite

facilitar la integración de los distintos componentes del circuito, especialmente aquellos procedentes de sistemas de refrigeración líquida, que habitualmente emplean este tipo de rosca normalizada.

Asimismo, debido a la disposición espacial de los distintos componentes del banco, ha sido necesario incorporar racores con diferentes geometrías [33], que permiten adaptar la dirección de las tuberías en función del recorrido del circuito hidráulico. En este sentido, se han utilizado manguitos rectos, en ángulo de 90° y en forma de T, los cuales permiten realizar derivaciones del flujo o modificar la dirección de la conducción del fluido según las necesidades del diseño.

Por otro lado, en determinadas zonas del banco de ensayos ha sido necesario modificar el diámetro de las conexiones, ya sea por las características de ciertos componentes comerciales o por los requerimientos de caudal del sistema. Como consecuencia, se han utilizado racores reductores y adaptadores de rosca, que permiten realizar transiciones entre diferentes tamaños de conexión. Entre ellos destacan los adaptadores de G 1/4" a G 1/2", de G 1/2" a G1 y de G 1/2" a G 1 1/4.

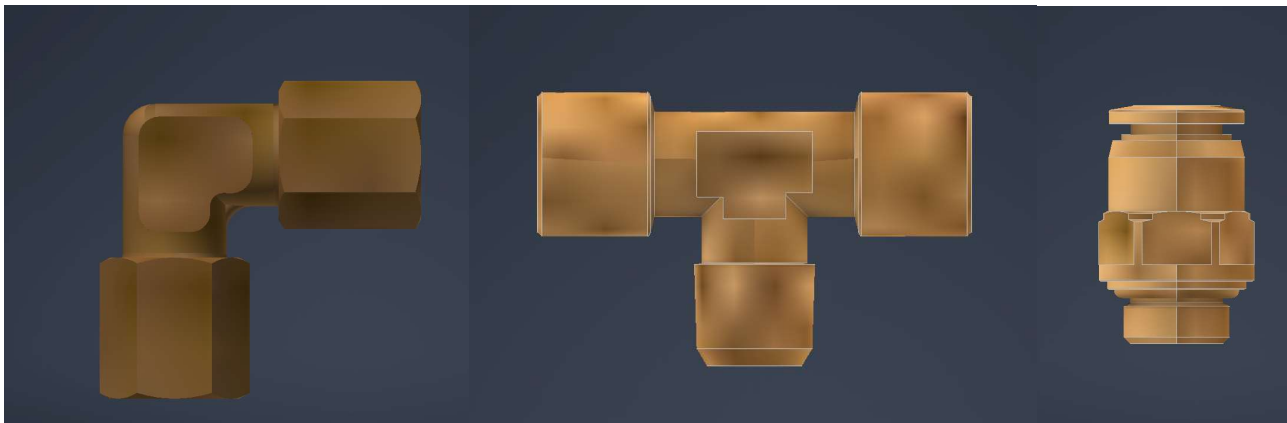


Figura 3-16 Geometría de los manguitos utilizados (CAD)

Por último, se han utilizados válvulas de bola, cuyo diseño se ha obtenido de la biblioteca de TraceParts [34] para asegurar el paso del fluido a la sección del banco que se requiere en cada momento. Las válvulas utilizadas en el banco han sido seleccionadas principalmente por su simplicidad de funcionamiento, fiabilidad y baja pérdida de carga cuando se encuentran completamente abiertas. Este tipo de válvulas permite controlar el paso del fluido mediante la rotación de una esfera perforada situada en su interior, lo que facilita una apertura o cierre rápido del circuito.

Su utilización resulta especialmente adecuada en el banco de ensayos, ya que permite aislar fácilmente diferentes partes del circuito hidráulico, controlar el flujo del fluido durante la puesta en marcha o el mantenimiento del sistema y garantizar un funcionamiento seguro y estable. Además, las válvulas de bola presentan una construcción robusta y una elevada estanqueidad, lo que reduce el riesgo de fugas y asegura la correcta operación del banco durante los ensayos experimentales [35].



Figura 3-17 Válvula utilizada en el banco modelo CAD

3.5 Diseño CAD del banco

El diseño asistido por ordenador del banco de ensayos desarrollado mediante Autodesk Inventor ha constituido una de las fases que mayor dedicación ha requerido durante el desarrollo del presente trabajo. A través de esta etapa se ha llevado a cabo el modelado tridimensional de todos los elementos que componen el banco, así como su integración en un único conjunto que reproduce el funcionamiento real del sistema.

En una primera fase del proceso de diseño fue necesario recopilar y obtener los modelos CAD compatibles con Inventor de los distintos componentes comerciales que forman parte del banco de ensayos. Este proceso no resultó sencillo en algunos casos, ya que determinados elementos, especialmente aquellos relacionados con la instrumentación del sistema, no siempre disponían de modelos fácilmente accesibles. Entre los componentes que requirieron una búsqueda más exhaustiva se encuentran el purgador automático, los sensores de presión y la bomba de recirculación.

Una vez obtenidos los modelos correspondientes a los principales equipos, se procedió a su integración dentro del entorno de diseño. A partir de este punto fue necesario diseñar diversos elementos auxiliares que permiten conectar y estructurar el circuito hidráulico del banco. Entre estos elementos destacan los racores de conexión, las secciones de tubería rígida y las mangueras flexibles encargadas de transportar el fluido de trabajo entre los distintos componentes del sistema. El diseño y disposición de estos elementos ha sido fundamental para definir la geometría final del circuito y garantizar la correcta interconexión de todos los dispositivos.

Asimismo, otros componentes del banco, como el caudalímetro, la bomba principal del circuito, el sistema de disipación térmica o el intercambiador de calor, han requerido un proceso detallado de modelado y ensamblaje dentro del entorno CAD. Para ello se han tenido en cuenta las dimensiones y especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes, con el objetivo de reproducir de forma fiel sus características geométricas y facilitar su integración dentro del banco de ensayos.

Durante esta fase del diseño también ha sido necesario ajustar la posición relativa de los distintos elementos con el fin de garantizar una correcta distribución espacial del sistema. Este proceso ha permitido comprobar la compatibilidad geométrica entre componentes, evitar interferencias entre piezas y optimizar la disposición del circuito para mantener una configuración compacta y modular, en línea con los criterios de diseño establecidos para el banco de ensayos.

El modelo CAD resultante (ver figura 3-18) permite visualizar de forma completa el banco de ensayos y analizar su configuración antes de su posible construcción física. Además, este modelo facilita la generación de planos, esquemas y representaciones gráficas que contribuyen a una mejor comprensión del funcionamiento del sistema.

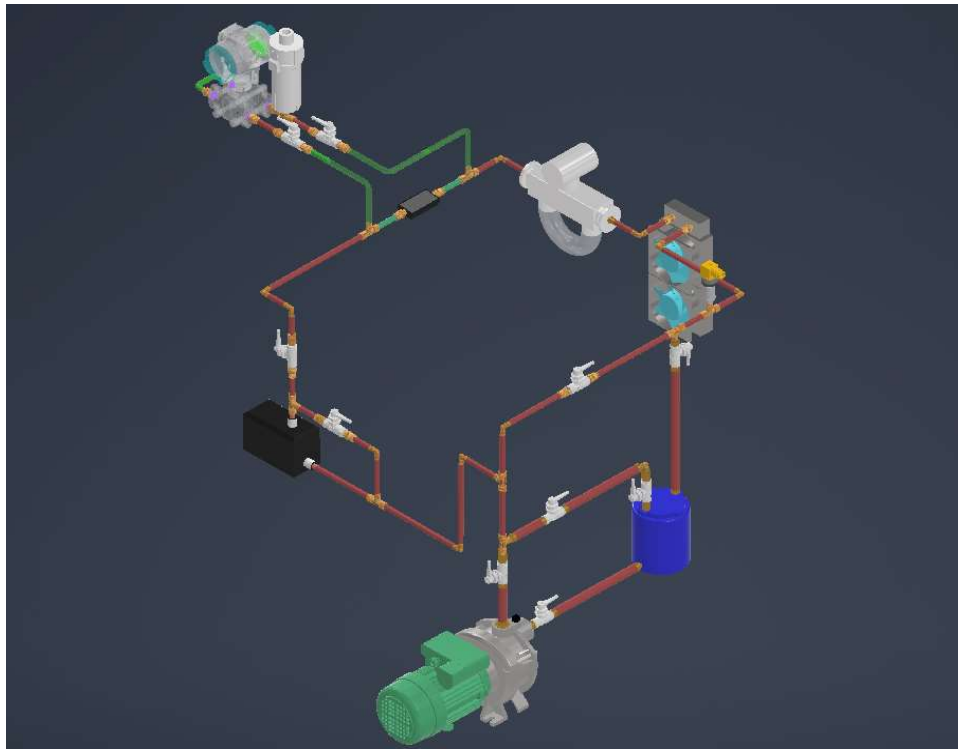


Figura 3-18 Ilustración del banco de ensayos (CAD)

3.5.1 Soporte del banco

Además del diseño del circuito hidráulico y de los distintos componentes que lo integran, ha sido necesario desarrollar una estructura de soporte para el banco de ensayos (ver figura 3-19). Con este objetivo se ha diseñado un marco estructural cuya función principal es proporcionar rigidez al conjunto, delimitar el espacio ocupado por la instalación y facilitar su manipulación y transporte.

El marco del banco se ha concebido como una estructura que envuelve y soporta los diferentes elementos del sistema, permitiendo mantener una disposición ordenada y segura de los componentes. Esta estructura también contribuye a proteger ciertos elementos sensibles del circuito y a facilitar la fijación de dispositivos como bombas, sensores o tuberías.

Durante el proceso de diseño del marco se han tenido en cuenta aspectos como la estabilidad del conjunto, la accesibilidad a los diferentes componentes del banco y la posibilidad de realizar operaciones de mantenimiento o sustitución de piezas. Asimismo, se ha buscado mantener una estructura relativamente ligera que permita transportar el banco de ensayos de forma sencilla dentro del laboratorio.

El diseño del marco se ha realizado igualmente mediante herramientas CAD, lo que ha permitido integrarlo directamente con el modelo tridimensional del banco de ensayos y verificar la correcta disposición de todos los elementos dentro de la estructura.

DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DE INTERCAMBIADORES
DE CALOR EN REFRIGERACIÓN LÍQUIDA DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

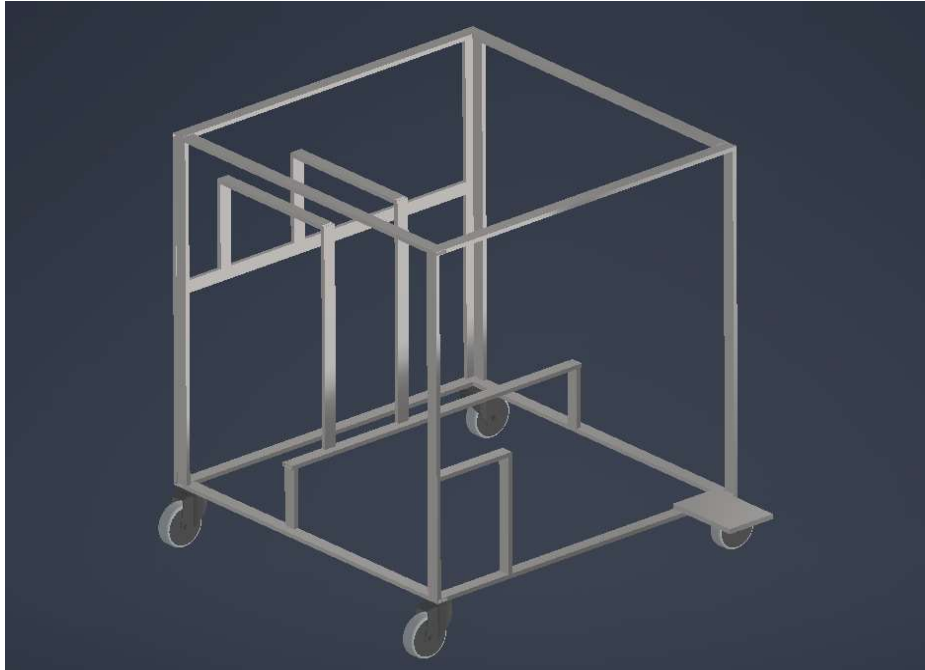


Figura 3-19 Estructura de soporte para el banco de ensayos (CAD)

De esta manera el banco queda enmarcado y con se presenta la posibilidad de ser transportado tal y como se observa a continuación (Ver figura 3-20).

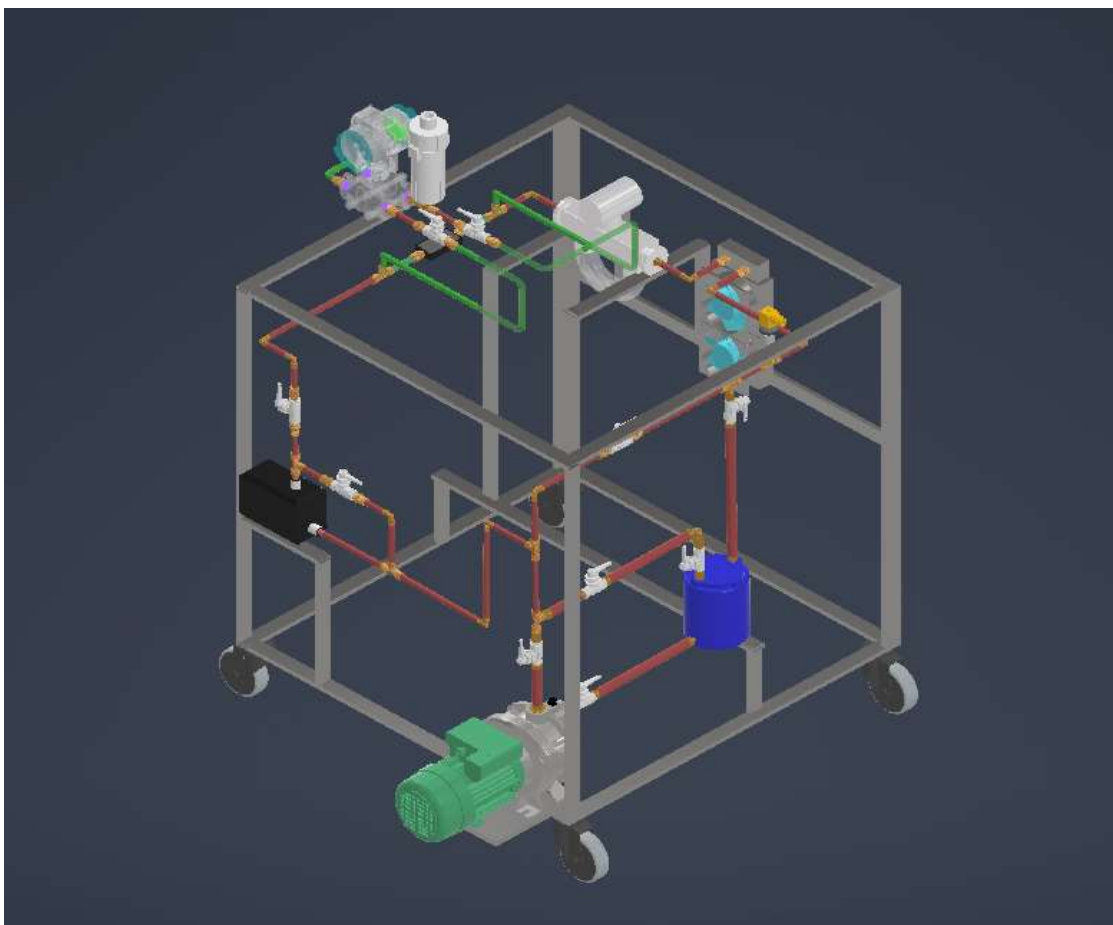


Figura 3-20 Ensamblaje completo del banco y el soporte

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Validación conceptual del banco de ensayos

En el apartado desarrollado a continuación se realiza una validación conceptual del banco de ensayos diseñado a lo largo de este trabajo, con el objetivo de comprobar el grado de cumplimiento de los requisitos y criterios de diseño establecidos en fases previas del proyecto. Dado que el banco no ha sido construido físicamente, esta validación se basa en el análisis del diseño desarrollado, su funcionalidad prevista y su adecuación a los objetivos planteados.

En primer lugar, con el banco de ensayos diseñado se ha conseguido el objetivo principal del proyecto, que consiste en disponer de una instalación experimental capaz de estudiar el comportamiento térmico e hidráulico de intercambiadores de calor en sistemas de refrigeración líquida. La configuración del sistema permite integrar distintos tipos de intercambiadores, facilitando su sustitución y permitiendo la realización de ensayos comparativos entre diferentes geometrías y diseños.

Asimismo, uno de los aspectos clave considerados durante el diseño ha sido la flexibilidad en el uso de distintos fluidos de trabajo. El banco permite la circulación de diferentes fluidos refrigerantes, lo que posibilita el estudio de su influencia en el rendimiento del sistema. Esta característica amplía significativamente el campo de aplicación del banco de ensayos y lo convierte en una herramienta versátil para el análisis experimental.

Otro de los criterios de diseño que se han validado es la capacidad de control de las condiciones de presión del sistema. El banco permite tanto la presurización como la despresurización del circuito, gracias al sistema de válvulas instalado lo que facilita su manipulación en condiciones seguras y permite reproducir diferentes escenarios de operación. Este aspecto resulta especialmente relevante en ensayos experimentales, donde es necesario adaptar las condiciones de funcionamiento en función del tipo de prueba a realizar.

Desde el punto de vista constructivo, el diseño propuesto presenta una configuración compacta y poco voluminosa, lo que facilita su integración en un entorno de laboratorio sin requerir grandes espacios. La disposición de los distintos componentes ha sido optimizada para mantener una estructura ordenada, accesible y coherente con los criterios de modularidad definidos en el diseño.

Además, el banco de ensayos incorpora todos los elementos necesarios para la monitorización de las variables fundamentales del sistema, como el caudal del fluido, la presión en el circuito y la presión diferencial en el intercambiador de calor. La inclusión de estos dispositivos de medida permite obtener información relevante sobre el comportamiento del sistema, lo que resulta imprescindible para la posterior realización de ensayos experimentales.

En conjunto, con el diseño desarrollado se ha conseguido un banco de ensayos que cumple con los objetivos planteados al inicio del proyecto, proporcionando una base sólida para la realización de estudios experimentales en el ámbito de la refrigeración líquida. La combinación de modularidad, capacidad de instrumentación y flexibilidad operativa permite considerar el sistema como una herramienta adecuada para la evaluación de intercambiadores de calor en condiciones controladas.

4.2 Validación modular del banco de ensayos

4.2.1 Funcionamiento esperado

Como se ha expuesto durante todo el recorrido de la memoria, el banco de ensayos diseñado presenta un funcionamiento basado en la recirculación de un fluido de trabajo en un circuito cerrado, cuyo objetivo es simular las condiciones de operación de un sistema de refrigeración líquida. Durante su funcionamiento, el fluido es impulsado por la bomba a través del circuito hidráulico, atravesando los distintos elementos que lo componen tal y como se observó en la figura 3-1, entre los que destacan el intercambiador de calor, los dispositivos de medida y el sistema de disipación térmica.

El comportamiento esperado del sistema se caracteriza por una circulación continua del fluido, permitiendo la transferencia de calor en el intercambiador y su posterior disipación en el radiador. Este proceso reproduce de forma simplificada el funcionamiento de sistemas reales de refrigeración líquida, lo que permite analizar el rendimiento térmico e hidráulico del intercambiador en condiciones controladas.

Asimismo, el diseño del banco permite operar en diferentes condiciones de caudal y presión, lo que facilita el estudio del comportamiento del sistema bajo distintos regímenes de funcionamiento. De este modo, el banco de ensayos se configura como una herramienta capaz de reproducir escenarios de operación representativos de aplicaciones reales.

4.2.2 Manipulación del banco

En este apartado se describe el procedimiento de operación del banco de ensayos, detallando la circulación del fluido a través del sistema y las acciones necesarias para llevar a cabo distintas maniobras, como la presurización, despresurización o sustitución de componentes. Para ello, el banco dispone de un conjunto de válvulas cuya apertura o cierre permite controlar el flujo del fluido en función de la operación deseada.

Con el fin de facilitar la comprensión de los procedimientos descritos, las válvulas del sistema han sido numeradas y se representarán en las figuras correspondientes mediante un código de colores, donde el color verde indica válvulas abiertas y el color rojo válvulas cerradas.

En primer lugar, iniciar el funcionamiento del banco de ensayos, es necesario proceder a su presurización. Este proceso comienza activando la bomba de carga del circuito, lo que permite impulsar el fluido a través del circuito hidráulico.

Una vez en funcionamiento, se deberán abrir las válvulas número 1 y 2 (verde), manteniendo cerradas las válvulas número 3 y 4 (rojo). Por otro lado, la válvula número 6 (rojo) debe de estar cerrada evitando así que no se presurice por completo. Con esta configuración (véase figura 4-1), el fluido circula a través de la zona principal del banco, entendida como aquella en la que se encuentran los elementos de medición, permitiendo alcanzar las condiciones necesarias para comenzar la toma de datos experimentales.

Cabe destacar que las válvulas número 2 y 3 pueden regularse durante el proceso con el objetivo de ajustar la presión del sistema en función de las necesidades del ensayo.

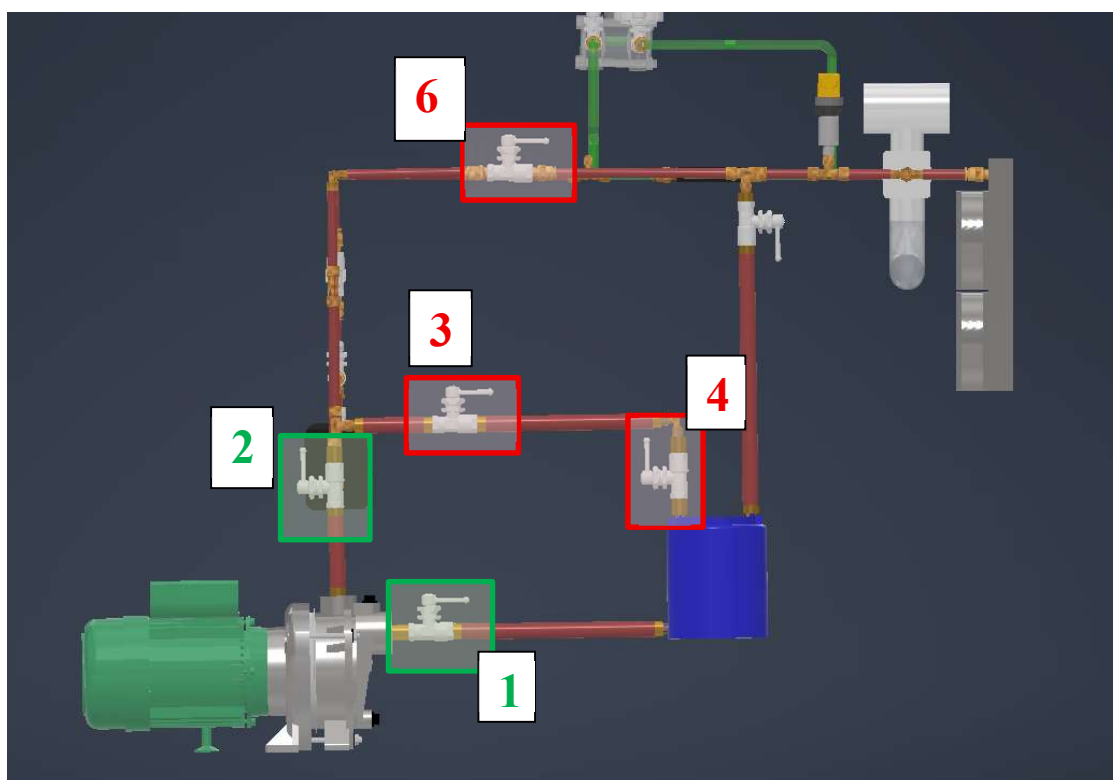


Figura 4-1 Configuración para presurización del banco

Para llevar a cabo la despresurización del sistema, se deberá modificar la configuración de las válvulas de forma que el fluido pueda retornar al depósito de manera controlada.

En este caso, se abrirá la válvula número 5 (verde), permitiendo la descarga del fluido hacia el depósito, mientras que la válvula número 6 (rojo) deberá permanecer cerrada. Asimismo, el resto de válvulas de la zona principal del banco deberán mantenerse cerradas para asegurar que el proceso de despresurización se realiza de forma controlada y segura (véase figura 4-2).

Este procedimiento resulta necesario antes de realizar cualquier operación de mantenimiento o modificación del sistema.

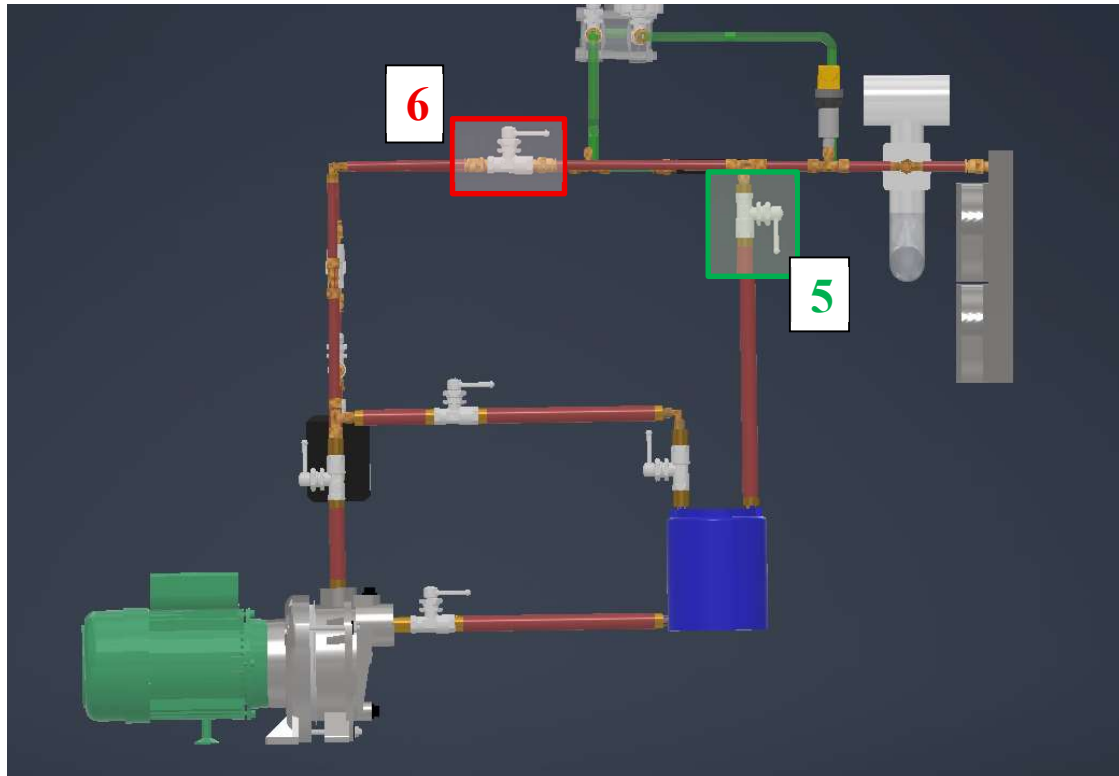


Figura 4-2 Configuración para despresurización del banco

Para realizar el cambio de fluido de trabajo o la sustitución del intercambiador de calor, es imprescindible que el banco se encuentre completamente detenido y sin presión en su interior.

Una vez lleno y presurizado el sistema, es necesario realizar el purgado del circuito con el objetivo de eliminar posibles bolsas de aire que puedan afectar al correcto funcionamiento del banco.

Este proceso se lleva a cabo mediante la circulación continua del fluido a través del circuito durante aproximadamente una hora, manteniendo cerradas las válvulas del sistema de llenado y abierta la válvula número 6 (verde). Esta configuración permite la evacuación del aire presente en el sistema sin interrumpir la circulación del fluido.

Durante el proceso de purgado, se deberá supervisar la presión del circuito. En caso de que esta disminuya por debajo del valor requerido para la realización de los ensayos, será necesario proceder a una nueva presurización del sistema y repetir el proceso de purgado hasta alcanzar condiciones estables de funcionamiento.

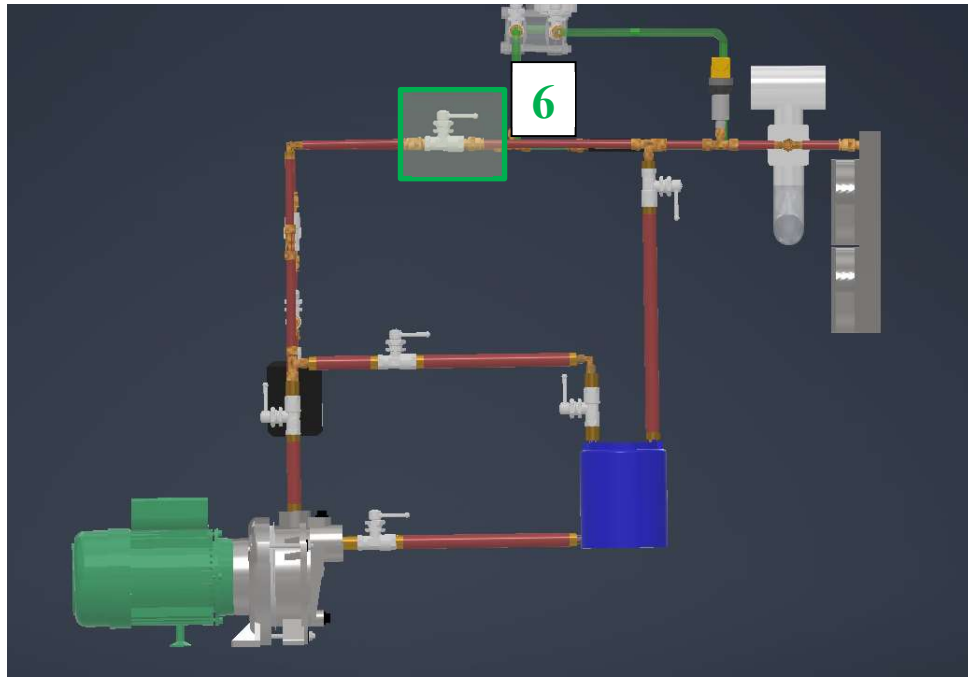


Figura 4-3 Configuración para el purgado

Una vez completado el purgado, el banco de ensayos se encuentra en condiciones de funcionamiento normal. En esta fase, el fluido circula de forma continua a través del circuito principal, atravesando los dispositivos de medida y el intercambiador de calor.

Las válvulas del circuito se mantienen en la configuración correspondiente al ensayo, pudiendo ajustarse aquellas destinadas a la regulación del caudal para adaptar las condiciones de operación a los requerimientos experimentales.

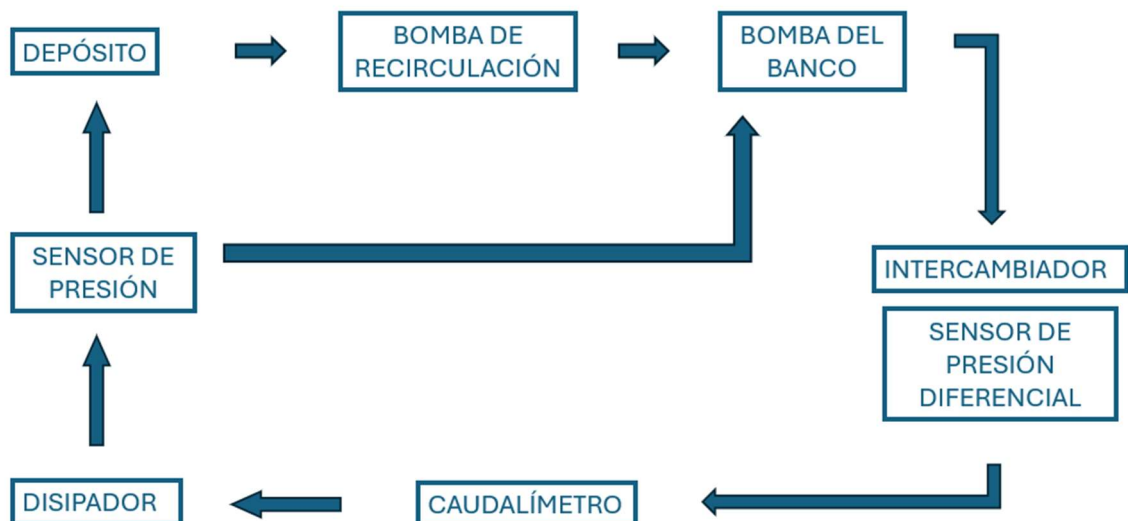


Figura 4-4 Esquema funcional del circuito

Para el vaciado del circuito no es necesario realizar un proceso de purgado previo. Este procedimiento se lleva a cabo mediante la apertura de las válvulas del sistema de llenado, permitiendo que el fluido contenido en el circuito retorne al depósito por efecto de la gravedad.

Durante este proceso, el fluido se recoge en el depósito, facilitando su posterior reutilización o sustitución en función de las necesidades del ensayo. Una vez en este punto, se podrá cambiar tanto en fluido de trabajo como el intercambiador, ya que las conexiones que se han diseñado nos permiten hacerlo con gran facilidad.

4.2.3 Utilidad para ensayos

El banco de ensayos diseñado permite plantear diferentes tipos de estudios experimentales orientados al análisis del comportamiento de sistemas de refrigeración líquida en condiciones controladas. A partir de su configuración, es posible definir procedimientos de ensayo que permitan evaluar el rendimiento de los intercambiadores de calor bajo distintas condiciones de operación.

En particular, el sistema permite estudiar la influencia del caudal del fluido en el comportamiento hidráulico del circuito, analizando la relación entre el régimen de circulación y las pérdidas de carga generadas en el intercambiador. Asimismo, la instrumentación disponible posibilita la medición de la presión diferencial, lo que permite caracterizar el comportamiento del flujo a través de diferentes geometrías.

Por otro lado, el banco facilita la realización de ensayos comparativos entre distintos intercambiadores de calor, permitiendo evaluar su comportamiento en condiciones similares de operación. Este tipo de análisis resulta especialmente útil para determinar la influencia de la geometría interna del intercambiador en su rendimiento.

Adicionalmente, la posibilidad de emplear distintos fluidos de trabajo permite estudiar el efecto de sus propiedades físicas sobre el comportamiento del sistema, abriendo la puerta a análisis más completos en los que se consideren diferentes condiciones de operación.

En este sentido, el banco de ensayos no solo constituye una herramienta de validación experimental, sino también una plataforma flexible para el desarrollo de futuros estudios orientados a la optimización de sistemas de refrigeración líquida.

4.3 Costes de fabricación y montaje del proyecto

En el presente apartado se realiza una estimación económica del banco de ensayos diseñado a lo largo del trabajo. Con este objetivo, se analizan de forma individual los principales elementos que componen el sistema, asignando a cada uno de ellos un coste aproximado basado en precios de mercado obtenidos a partir de catálogos comerciales y proveedores especializados.

La estimación del presupuesto se ha organizado diferenciando dos bloques principales. Por un lado, se consideran los componentes que forman parte del circuito hidráulico y del sistema de instrumentación del banco de ensayos, tales como bombas, sensores, intercambiador de calor, caudalímetro, válvulas, racores, mangueras y demás elementos necesarios para el funcionamiento del circuito de refrigeración líquida. Por otro lado, se evalúa el coste asociado a la estructura de soporte del banco, que incluye los perfiles estructurales y los elementos necesarios para su ensamblaje.

El objetivo de este análisis no es proporcionar un presupuesto exacto de fabricación, sino obtener una estimación realista del coste del sistema diseñado, lo que permite valorar la viabilidad económica del banco de ensayos y disponer de una referencia aproximada en caso de plantear su futura construcción.

4.3.1 Coste de componentes instrumentales

En este apartado se presenta la estimación del coste asociado a los componentes de instrumentación empleados en el banco de ensayos. Estos elementos son aquellos que permiten la medición y monitorización de las principales variables del sistema durante los ensayos experimentales.

La Tabla 4-1 recoge los distintos dispositivos de medida considerados en el diseño, así como una estimación de su coste unitario y del coste total asociado a su incorporación en el banco de ensayos.

Elemento	Número de elementos	Precio unitario	Precio total
Depósito	1	4,05 €/ud	4,05 €
Bomba centrífuga EHEIM Universal 300	1	68,49 €	68,49 €
Bomba de recirculación	1	503,11 €	503,11 €
Placa del disipador	1	94,57 €	94,57 €
Ventilador	2	14,99 €/ud	29,98 €
Caudalímetro	1	4.490,03 €	4.490,03 €
Purgador	1	30,06 €	30,06 €
Sensor de presión diferencial SITRANS P320	1	1.407,27 €	1.407,27 €
Sensor de presión SITRANS P210	1	570 €	570 €
		TOTAL	7.197,56 €

Tabla 4-1 Resultado de precios de los instrumentos del banco

4.3.2 Coste de piezas y conductos

En este apartado se evalúa el coste de los componentes que forman parte del circuito hidráulico del banco de ensayos. Entre estos elementos se incluyen válvulas, racores, mangueras y demás accesorios necesarios para garantizar la circulación del fluido de trabajo a través del sistema sin tener en cuenta las bombas, que aunque forman parte de la hidráulica, se han tenido en cuenta como elementos fundamentales en la tabla de presupuestos anteriormente mostrada.

La estimación económica de estos elementos resulta fundamental (ver tabla 4-2), ya que constituyen la base funcional del banco de ensayos y representan una parte significativa del coste total del sistema.

Elemento	Número de elementos	Precio unitario	Precio total
Manguera flexible	1m	3,93 €/m	3,93 €
Tubería de cobre ¼"	3m	6,29 €/m	18,87 €
Tubería de cobre ½"	1m	8,1 €/m	8,1 €
Manguito de latón	18	2,59 €/ud	46,62 €
Manguito en "T"	8	4,5 €/ud	36 €
Manguito codo 90°	11	7,2 €/ud	43,2 €
Válvula	9	32,81 €	295,29 €
Manguito ¼"- ½"	13	1,45 €/ud	18,85 €
Manguito 1"- ½"	1	2,08 €/ud	2,08 €
Manguito 1 ¼"- ½"	1	2,76 €/ud	2,76 €
TOTAL			475,50 €

Tabla 4-2 Resultado de precios de los componentes hidráulicos del banco

4.3.3 Coste del soporte del banco

Además de los componentes funcionales del circuito hidráulico y del sistema de instrumentación, el banco de ensayos requiere una estructura de soporte que permita fijar y organizar adecuadamente los distintos elementos que lo integran. Esta estructura proporciona estabilidad al conjunto, facilita el montaje del sistema y permite su manipulación dentro del entorno de laboratorio.

En la Tabla 4-3 se presentan los materiales y elementos estructurales considerados para la fabricación del soporte del banco, junto con una estimación de su coste.

Elemento	Número de elementos	Precio unitario	Precio total
Panel de acero rectangular	14m	6,28 €/m	88,02 €
Rueda	4	4,95 €/ud	19,80 €
Plancha acero	1	43,62 €/ud	43,62 €
TOTAL			151,44 €

Tabla 4-3 Resultado de precios de componentes del soporte

4.3.1 Presupuesto total estimado

En este último apartado, se expone el coste total del banco de ensayos que se ha obtenido sumando los costes parciales de cada uno de los apartados anteriores.

Sección	Presupuesto
Piezas y conductos	475,50 €
Hidráulica	7.197,56 €
Soporte	151,44 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	7.824,70 €

Tabla 4-4 Presupuesto final estimado

Destacar que el precio anterior mostrado es el precio sin IVA del producto total al que se le debe aplicar un 21 % de impuestos.

Por tanto:

$$21 \% \text{ de } 7.824,70 = 1.643,19$$

$$7.824,70 + 1.643,19 = 9.467,89$$

Tras la suma del IVA, el precio total de la elaboración del banco de ensayos diseñado sería de 9.467,89 €.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusión

En el Trabajo de Fin de Grado presentado se ha llevado a cabo el diseño completo de un banco de ensayos destinado al estudio del comportamiento térmico e hidráulico de intercambiadores de calor en sistemas de refrigeración líquida. A lo largo del desarrollo del trabajo, se ha abordado el problema desde una perspectiva de ingeniería aplicada, partiendo de la identificación de necesidades experimentales hasta la definición detallada de una solución funcional.

Es importante destacar que el propósito del banco de ensayos diseñado no es su integración directa en un dispositivo electrónico para su refrigeración, sino su utilización como herramienta experimental para la evaluación de intercambiadores de calor. Este enfoque permite analizar de forma independiente el comportamiento de estos elementos antes de su implementación en sistemas reales, facilitando la obtención de datos que posteriormente pueden aplicarse al diseño de soluciones de refrigeración en dispositivos electrónicos.

El desarrollo del proyecto ha comenzado con la definición de los requisitos y criterios de diseño que debía cumplir el banco de ensayos. Entre ellos destacan la necesidad de disponer de un sistema compacto, modular, capaz de operar con distintos fluidos de trabajo y que permita la sustitución de intercambiadores de calor, así como la monitorización de variables fundamentales como el caudal y la presión del sistema.

A partir de estos requisitos iniciales, se planteó un primer esquema conceptual del banco de ensayos, el cual fue evolucionando progresivamente a medida que se avanzaba en el diseño. Este proceso ha permitido optimizar la disposición de los componentes, mejorar la funcionalidad del sistema y adaptar la configuración del circuito a las necesidades experimentales planteadas a medida que se ha ido avanzando en el proyecto.

En fases posteriores, se ha realizado la selección y diseño CAD de los componentes que integran el banco, incluyendo bombas, sensores, válvulas, intercambiadores y elementos de conexión, siendo esta fase junto con el proceso de su ensamblaje un largo proceso en el que se adquieren conocimientos en la plataforma Autodesk Inventor así como en conceptos de hidráulica. Esta selección se ha llevado a cabo teniendo en cuenta tanto las prestaciones técnicas de cada elemento como su compatibilidad con el resto del sistema, garantizando así un funcionamiento coherente y seguro del conjunto.

El diseño CAD del banco de ensayos ha permitido integrar todos los componentes en un modelo tridimensional completo, facilitando la visualización del sistema, la comprobación de interferencias y la optimización de la distribución espacial. Asimismo, se ha desarrollado una estructura de soporte que permite organizar los distintos elementos del banco, mejorar su estabilidad y facilitar su manipulación en un entorno de laboratorio.

Como resultado final, se ha obtenido un diseño de banco de ensayos que cumple con los objetivos planteados al inicio del proyecto. El sistema presenta una configuración compacta, modular y funcional, capaz de operar en distintas condiciones y de adaptarse a diferentes escenarios experimentales. Además, incorpora los elementos necesarios para la monitorización de variables relevantes, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para el estudio experimental de intercambiadores de calor en sistemas de refrigeración líquida.

En definitiva, el trabajo desarrollado proporciona una base sólida para la futura construcción y utilización del banco de ensayos, contribuyendo al avance en el conocimiento experimental de sistemas de refrigeración líquida y al análisis del comportamiento de intercambiadores de calor y fluidos refrigerantes en aplicaciones reales.

5.2 Limitaciones

A pesar de que el desarrollo del trabajo ha permitido desarrollar un diseño completo de un banco de ensayos para el estudio de intercambiadores de calor, es importante destacar una serie de limitaciones que han condicionado el alcance del proyecto.

La principal limitación ha sido la imposibilidad de llevar a cabo la construcción física del banco de ensayos. Esta restricción ha estado motivada por la disponibilidad limitada de tiempo y recursos materiales, lo que ha impedido materializar el diseño desarrollado en una instalación real. Como consecuencia, el trabajo se ha centrado en el diseño detallado del sistema, sin poder abordar su implementación práctica.

Derivada de esta limitación, se encuentra la ausencia de ensayos experimentales que permitan validar empíricamente el comportamiento del banco de ensayos. La falta de una instalación física ha impedido la obtención de datos reales, lo que supone que la validación del sistema se ha realizado sin poder contrastar su rendimiento mediante medidas experimentales.

Asimismo, algunas de las decisiones adoptadas durante el diseño, especialmente en lo relativo a la selección de componentes y a la estimación de parámetros de funcionamiento, se han basado en información proporcionada por fabricantes y en referencias bibliográficas. Aunque estas fuentes son fiables, la ausencia de validación experimental introduce un cierto grado de incertidumbre en el comportamiento real del sistema.

Sin embargo, estas limitaciones no invalidan el trabajo realizado, poniendo de manifiesto la necesidad de una fase posterior de construcción y experimentación que permita verificar y completar los resultados obtenidos en este proyecto. Para ello, resulta necesario destacar, que el precio no supondrá una limitación, ya que este banco de ensayos se encuadra dentro de un proyecto de investigación (PICUD-2024-05) del CUD-ENM y encaja dentro de lo presupuestado en dicho proyecto para su realización.

5.3 Líneas futuras

El trabajo desarrollado en este proyecto establece una base sólida para el diseño de un banco de ensayos orientado al estudio de sistemas de refrigeración líquida. No obstante, existen diversas líneas futuras que permitirían ampliar el alcance del trabajo y profundizar en el análisis experimental del sistema.

La principal línea de desarrollo a partir del trabajo realizado consiste en la construcción física del banco de ensayos diseñado. La materialización del sistema permitiría el estudio experimental que hoy día es escaso y que añadido al amplio conocimiento teórico que existe en este ámbito ayudaría a verificar el comportamiento real del circuito hidráulico y comprobar el correcto funcionamiento de los distintos componentes en condiciones de operación. Esta fase resultaría fundamental para validar experimentalmente el diseño propuesto.

Una vez construido el banco, se plantea como siguiente paso la realización de ensayos experimentales que permitan recopilar datos reales sobre el comportamiento térmico e hidráulico de distintos intercambiadores de calor. Estos ensayos permitirían analizar variables como el caudal, la presión o las pérdidas de carga, facilitando la comparación entre diferentes configuraciones y contribuyendo a la generación de conocimiento experimental en este campo.

Asimismo, el carácter modular del banco de ensayos diseñado permite su evolución y mejora progresiva, facilitando la incorporación de nuevos componentes o la modificación de los existentes. En este sentido, futuras mejoras podrían centrarse en la optimización del sistema de instrumentación, incorporando sensores adicionales o de mayor precisión que permitan mejorar la calidad de los datos obtenidos.

Otra posible línea de trabajo consiste en la integración de un sistema de adquisición de datos automatizado, que permita registrar de forma continua las variables medidas durante los ensayos. Esto facilitaría el análisis posterior de los resultados y permitiría realizar estudios más complejos, como la obtención de curvas características del sistema o la validación de modelos teóricos.

Por último, el banco de ensayos diseñado podría servir como base para el desarrollo de trabajos futuros de carácter experimental o académico, en los que se profundice en el análisis de intercambiadores de calor, el estudio de nuevas geometrías o la optimización de sistemas de refrigeración en aplicaciones electrónicas.

En este sentido, el banco de ensayos desarrollado no solo constituye el resultado del presente trabajo, sino también el punto de partida para futuras investigaciones en el ámbito de la refrigeración líquida.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Transporte de Energía UNAM: Introducción a la Convección», Transporte de Energía UNAM. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://equipo3transportedeenergia.blogspot.com/2017/05/introduccion-la-conveccion.html>
- [2] magazine, «Cómo optimizar la refrigeración líquida en tu PC: Guía Completa», Blog de tecnología. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ibertronica.es/blog/actualidad/como-optimizar-la-refrigeracion-liquida-en-tu-pc/>
- [3] «Heat exchanger and its principles of operation | Norditec-store.com», Nordic Tec Europe. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://norditec-store.com/blog/post/heat-exchanger-and-principles-of-its-operation?utm_source
- [4] «Heat Transfer — Introduction to Chemical and Biological Engineering». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.engr.colostate.edu/CBE101/topics/heat_transfer.html?utm
- [5] «Thermodynamics - Equilibrium, Heat, Energy | Britannica». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/heat/Heat-transfer>
- [6] «conducción, convección, y radiación el Tres modos de calor transferir», Vecteezy. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/50616942-conduccion-conveccion-y-radiacion-el-tres-modos-de-calor-transferir>
- [7] R. K. Shah y D. P. Sekulić, *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. doi: 10.1002/9780470172605.
- [8] A. Ewing, «The Complete Guide to Different Types of Heat Exchangers», Industrial Power Cooling UK. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcuk.com/types-of-heat-exchangers/>
- [9] «Cómo Funciona un Intercambiador Carcasa Tubos – Formación Industrial». Accedido: 3 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://formacion-industrial.com/2020/12/31/como-funciona-un-intercambiador-de-calor-carcasa-tubos/>
- [10] A. Pérez Sánchez, E. J. Pérez Sánchez, A. Heredia Sánchez, y L. Pazos Amayuela, «Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona», *Nexo Rev. Científica*, vol. 32, n.º 01, pp. 61-74, jul. 2019, doi: 10.5377/nexo.v32i01.7988.
- [11] I. T. Helpdesk, «5 Types of Heat Exchangers & Their Advantages», PT Contromatic Prima Mandiri. Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://contromatic.co.id/heat-exchanger/types-of-heat-exchangers/>
- [12] S. J. Kim y D. Kim, «Forced Convection in Microstructures for Electronic Equipment Cooling», *J. Heat Transf.*, vol. 121, n.º 3, pp. 639-645, ago. 1999, doi: 10.1115/1.2826027.

- [13] G. Colangelo, E. Favale, M. Milanese, A. De Risi, y D. Laforgia, «Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 421-435, dic. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.042.
- [14] S. J. Kim y D. Kim, «Forced Convection in Microstructures for Electronic Equipment Cooling», *J. Heat Transf.*, vol. 121, n.º 3, pp. 639-645, ago. 1999, doi: 10.1115/1.2826027.
- [15] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, y A. S. Lavine, Eds., *Principles of heat and mass transfer*, 7. ed., International student version. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [16] S. G. Kandlikar, «Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels», *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 26, n.º 2-4, pp. 389-407, jun. 2002, doi: 10.1016/S0894-1777(02)00150-4.
- [17] M. T. Tahir *et al.*, «Thermal Management of Microelectronic Devices Using Nanofluid with Metal foam Heat Sink», *Micromachines*, vol. 14, n.º 7, p. 1475, jul. 2023, doi: 10.3390/mi14071475.
- [18] G. L. Morini, «Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results», *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 43, n.º 7, pp. 631-651, jul. 2004, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2004.01.003.
- [19] «Hydro X Series XR5 240 NEO Water Cooling Radiator», CORSAIR. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.corsair.com/es/es/p/custom-liquid-cooling/cx-9032002-ww/hydro-x-series-xr5-240-neo-water-cooling-radiator-cx-9032002-ww>
- [20] «120mm 12V Ventilador para PC - Velocidad de Viento Ajustable, Ventilador de Pc, ventilador AC 220V - 240V, 2700RPM, ventiladores de PC Portátil para Router,Laptop, TV Box, Ventiladores Dual : Amazon.es: Industria, empresas y ciencia». Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/Doble-120mm-12V-Ventilador-para/dp/B0FQV68GY1/ref=abl_lv_ov_lig?colid=2EURDM65QETET&coliid=I1TVJ8Y11JU1VF&sbo=RZvfv%2F%2FHxDF%2BO5021pAnSA%3D%3D&th=1
- [21] «A5E52748362en_FC5x0_OI».
- [22] «Universalpumpen», EHEIM. Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://eheim.com/es_ES/acuariofilia/tecnica/bombas/universal/universal-300
- [23] «ki_info».
- [24] «ki_info.pdf». Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.sacipumps.com/uploads/productos2/ki_info.pdf
- [25] «7MF1565-3BA00-1AA1 - Siemens SiePortal». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://sieportal.siemens.com/es-es/products-services/detail/7MF1565-3BA00-1AA1?tree=CatalogTree#overview>
- [26] «7MF0340-1MM01-5AF2 - Siemens SiePortal». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://sieportal.siemens.com/es-mx/products-services/detail/7MF03401MM015AF2?tree=CatalogTree#overview>
- [27] «ASCO - Archivos CAD gratuitos - Purgador automático de canalización - G1/2 - TraceParts». Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.traceparts.com/es/product/asco-purgador-automatico-de-canalizacion-g12?CatalogPath=ASCO_JOUOMATIC%3AASJC.ASJC1.07.030&Product=10-12052003-093092
- [28] «Automatic air vents | Caleffi S.p.a.» Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.caleffi.com/en-int/products/air-and-dirt-separation-devices/automatic-air-vents>
- [29] «Automatic Air Vent», Intatec. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.intatec.co.uk/products/automatic-air-vent/>
- [30] «How does an automatic air vent work?», Altecnic. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.altecnic.co.uk/2024/11/05/how-does-an-automatic-air-vent-work/>
- [31] «(EX)UNE-EN_ISO_228-1=2003».
- [32] «Reddit - <https://preview.redd.it/wcv3g4q53em31.jpg?width=796&format=pjpg&auto=webp&s=dafe5ea1b09c27fb1554b4f67dbbc9e104488101>». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en:

<https://www.reddit.com/media?url=https%3A%2F%2Fpreview.redd.it%2Fwcv3g4q53em31.jpg%3Fwidth%3D796%26format%3Dpng%26auto%3Dwebp%26s%3Ddfe5ea1b09c27fb1554b4f67dbbc9e104488101>

- [33] «Codo, Te, pieza en cruz - Swiss Fittings AG Online Shop - SWISS FITTINGS». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.swiss-fittings.com/es/uniones-con-anillo-de-corte/klemmringverschraubung/winkel-t-stuck-kreuzstuck>
- [34] «RS Group - Archivos CAD gratuitos - Válvula de bola manual, Legris, 0402 07 13, Latón - TraceParts». Accedido: 11 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.traceparts.com/es/product/rs-group-valvula-de-bola-manual-legris-0402-07-13-laton?CatalogPath=TRACEPARTS%3ATP07006001&Product=10-25042012-086200&PartNumber=0402%2007%2013>
- [35] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. en McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston, Mass.: McGraw-Hill Higher Education, 2006.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

En el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado no se ha incluido de forma explícita un apartado específico dedicado al análisis de las implicaciones sociales, ambientales o económicas. No obstante, el diseño del banco de ensayos y su aplicación potencial permiten identificar una serie de aspectos relevantes en estos ámbitos.

Desde el punto de vista social y de seguridad, el banco de ensayos ha sido diseñado teniendo en cuenta la necesidad de operar en condiciones seguras, incorporando elementos que permiten el control de la presión del sistema, así como procedimientos de purgado y despresurización que facilitan su manipulación sin riesgos. Estos aspectos se encuentran desarrollados principalmente en el apartado de manipulación del banco.

En relación con los aspectos ambientales, el sistema diseñado permite el uso controlado de fluidos de trabajo en un circuito cerrado, minimizando pérdidas y evitando vertidos. Asimismo, la posibilidad de reutilizar el fluido tras los ensayos contribuye a reducir el impacto ambiental asociado a su utilización.

Desde el punto de vista económico e industrial, el trabajo incluye una estimación del coste del banco de ensayos, lo que permite evaluar su viabilidad económica y su posible implementación en entornos de laboratorio o investigación. Además, el banco puede contribuir al desarrollo de soluciones más eficientes en sistemas de refrigeración líquida, con impacto potencial en sectores tecnológicos e industriales.

Por tanto, aunque estos aspectos no han sido desarrollados de forma específica a lo largo de la memoria, sí se han tenido en consideración durante el diseño del sistema, especialmente en lo relativo a seguridad, eficiencia y viabilidad.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado no ha requerido la toma de decisiones con implicaciones éticas directas de carácter crítico. No obstante, desde una perspectiva general, es posible realizar una reflexión sobre el papel de la ingeniería en el desarrollo de soluciones tecnológicas responsables.

El diseño de sistemas de refrigeración líquida más eficientes contribuye indirectamente a la reducción del consumo energético y a la mejora del rendimiento de dispositivos electrónicos, lo que tiene un impacto positivo en términos de sostenibilidad y uso responsable de los recursos.

Asimismo, el desarrollo de bancos de ensayos como el propuesto permite obtener datos experimentales que favorecen la toma de decisiones basadas en evidencia, reduciendo la incertidumbre en el diseño de sistemas reales y promoviendo soluciones más seguras y eficientes.

Desde el punto de vista ético, es responsabilidad del ingeniero garantizar que los sistemas diseñados sean seguros, fiables y respetuosos con el entorno. En este sentido, el presente trabajo refleja una aproximación rigurosa al diseño de un sistema experimental, considerando aspectos de seguridad, operatividad y funcionalidad.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se observa que aunque el trabajo no presenta implicaciones éticas directas relevantes, sí se enmarca dentro de una práctica responsable de la ingeniería, orientada a la mejora del conocimiento y al desarrollo de soluciones técnicas más eficientes y seguras.

ANEXO III: DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

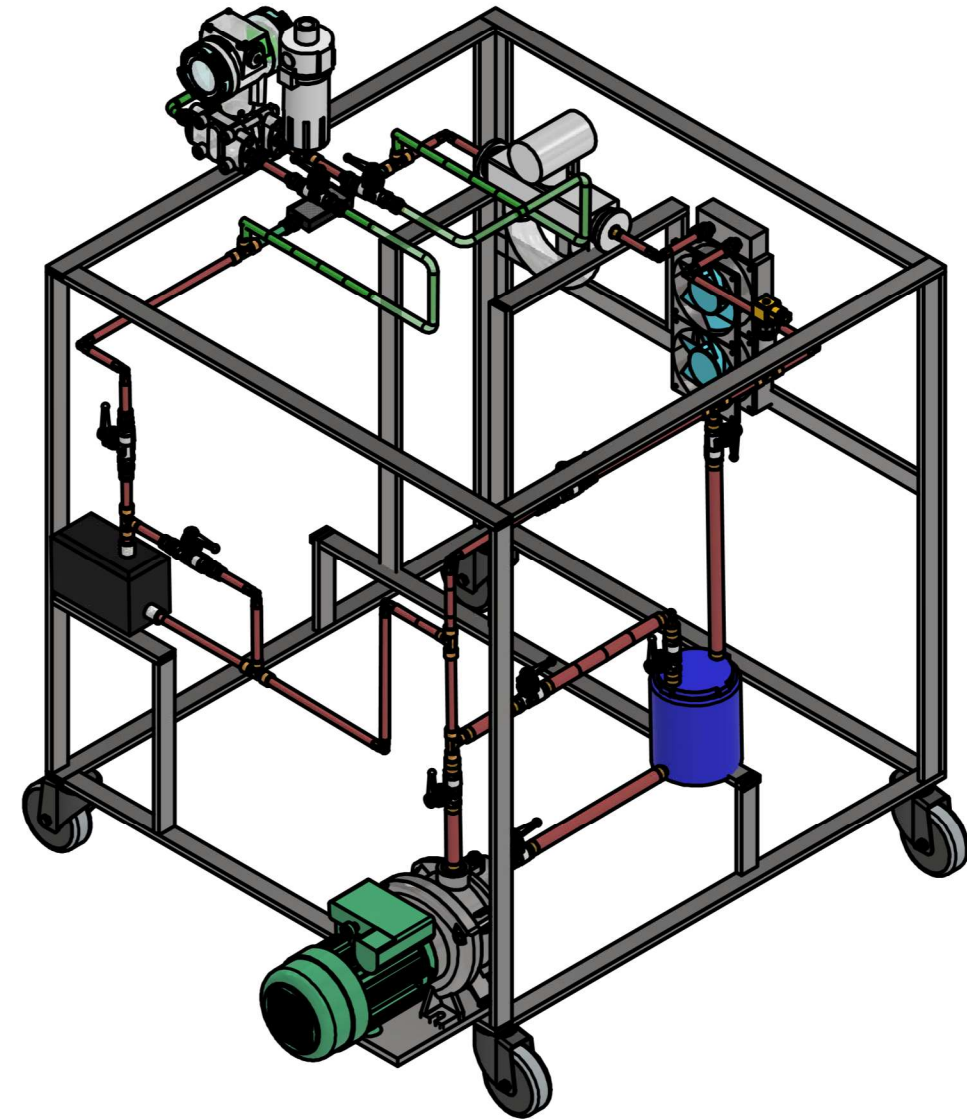
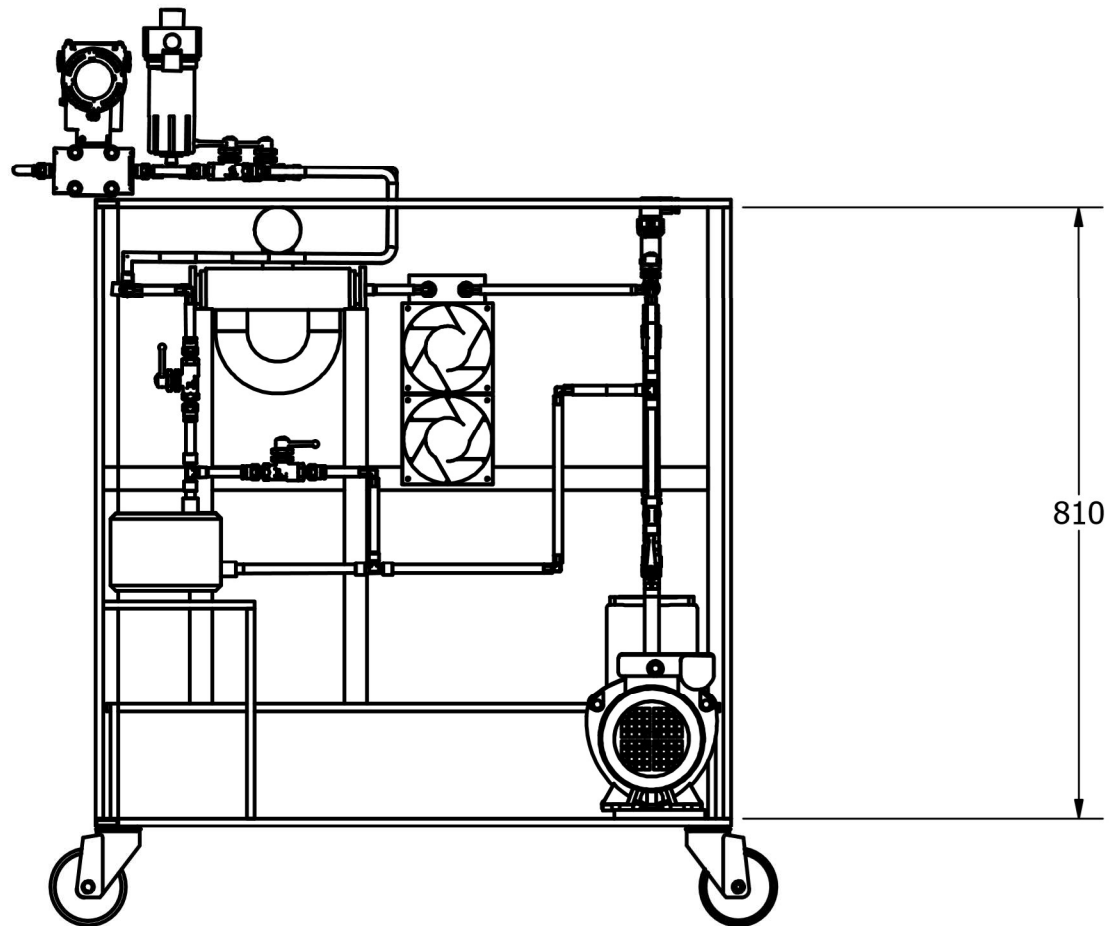
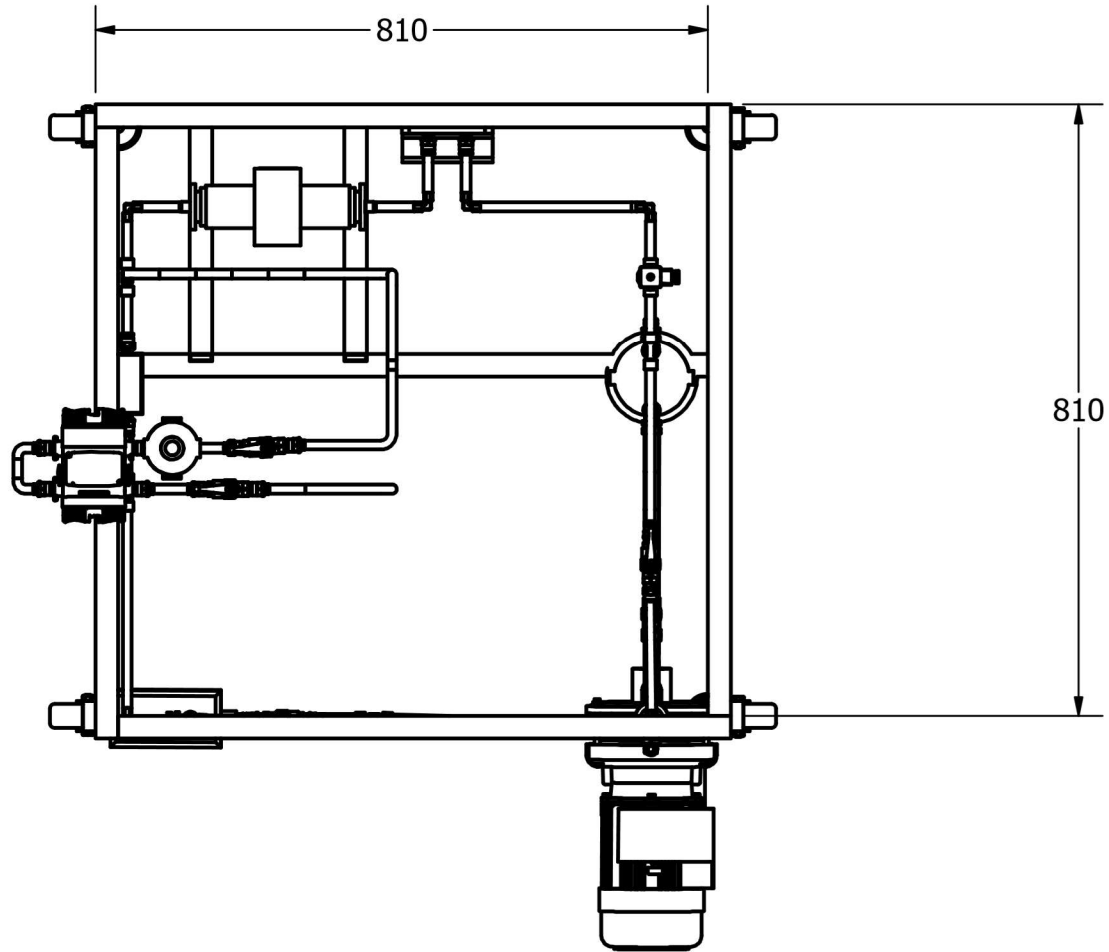
Para la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado se han empleado herramientas de inteligencia artificial, como apoyo en tareas relacionadas con la edición del texto, incluyendo la reformulación de párrafos, mejora de la cohesión y revisión del lenguaje.

Estas herramientas han sido utilizadas únicamente con el fin de apoyarse en la expresión escrita, orientadas a mejorar la calidad lingüística y la claridad del documento. En ningún momento han sido empleadas para la creación de contenido original de carácter técnico, ni para desarrollar los apartados que exponen la metodología, los resultados o el análisis del trabajo realizado.

El contenido académico desarrollado en este trabajo, abarcando desde el diseño del banco, su ensamblaje hasta el análisis de los elementos utilizados en el mismo ha sido elaborado por el autor. Además, se ha llevado a cabo una supervisión de todos los textos en los que se ha contado con asistencia de estas herramientas, asegurando su adecuación, coherencia y rigor científico.

ANEXO IV: PLANOS

En este anexo se presentan los planos que se consideran oportunos para la mejor visualización del diseño del banco de ensayos. Las medidas especificadas se encuentran en milímetros.



VISTA4
ESCALA 1 / 10

JORGE JIMÉNEZ MARTÍNEZ-DARVE

24/03/2026

Diseño de un banco de ensayos para el estudio de intercambiadores de calor en refrigeración líquida de dispositivos electrónicos

TAMAÑO

A3

BancoMedioB-1

ESCALA 1 / 10